



BRUNO MANUEL REAL DE SOUSA MELRO

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES TIPOLOGIAS DE FICHEIROS CLIMÁTICOS PARA ANÁLISE HIGROTÉRMICA DE EDIFÍCIOS

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil –
Perfil de Construção

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL – PERFIL DE
CONSTRUÇÃO

Universidade NOVA de Lisboa
maio, 2024

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES TIPOLOGIAS DE FICHEIROS CLIMÁTICOS PARA ANÁLISE HIGROTÉRMICA DE EDIFÍCIOS

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Construção

BRUNO MANUEL REAL DE SOUSA MELRO

Licenciado em Ciências de Engenharia civil

Orientador: Professor Doutor Guilherme Barreto Arez
Coelho, Professor Auxiliar, Faculdade de
Ciências e Tecnologia | NOVA FCT

Coorientadores: Professor Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar,
Professor Associado, Faculdade de Ciências e
Tecnologia | NOVA FCT

Presidente: Professor Doutor Daniel Aelenei, Professor
Associado, Faculdade de Ciências e
Tecnologia | NOVA FCT

Vogais: Professora Doutora Joana Fernandes Maia,
Professora Auxiliar, Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto | FEUP
Professor Doutor Guilherme Barreto Arez
Coelho, Professor Auxiliar, Faculdade de
Ciências e Tecnologia | NOVA FCT

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL – PERFIL DE CONSTRUÇÃO

Universidade NOVA de Lisboa
maio, 2024

Avaliação de diferentes tipologias de ficheiros climáticos para análise higrotérmica de edifícios

Copyright © Bruno Manuel Real de Sousa Melro, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Quero em primeiro lugar, agradecer ao Professor Doutor Luís Baltazar e ao Professor Doutor Guilherme Coelho por terem apresentado o tema sobre a dissertação e por terem-me dado a oportunidade de a desenvolver. Quero agradecer por toda a disponibilidade, documentos partilhados, esclarecimentos e pedagogia prestada no desenvolvimento da presente dissertação. Quero ainda agradecer ao Professor Doutor Guilherme Coelho por me ter sempre desafiado a construir mais e a melhorar o meu trabalho, oferecendo bons conselhos e orientações que ajudaram a completar a dissertação.

Em segundo lugar, quero agradecer a todos os professores do departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade NOVA que fizeram parte do meu progresso académico, por todos os conhecimentos transmitidos e por toda a dedicação ao ensino.

Em terceiro, agradecer ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera pela disponibilidade apresentada e por ter fornecido dados que foram chave no desenvolvimento da presente dissertação.

Agradeço a todos os meus amigos que direta ou indiretamente contribuíram para a pessoa que sou hoje. Em especial, ao Tiago Coluna por todos os conselhos e amizade nos momentos bons e difíceis, tanto na vida académica como na vida pessoal.

Por fim, um agradecimento especial ao meu irmão Henrique Melro, à minha mãe Ana Real e à minha namorada Mariana Marques Pinote, por toda a motivação, força, apoio e amor incondicional em todo o meu percurso de vida e neste percurso difícil que foi completar um curso superior.

“O que fazemos no presente ecoa por toda a eternidade.”
(Marcus Aurelius)

RESUMO

Numa análise térmica ou higrotérmica a um modelo computacional, um dos aspetos chave que influenciam a análise é a escolha do clima exterior de uma dada localização onde o modelo será inserido. Este clima é definido horariamente num ficheiro climático referente a um ano representativo do clima relativo à localização onde se pretende estudar. *Softwares* de análise como o Energy Plus ou WUFI Plus, entre outros, contêm na sua base de dados ficheiros climáticos representativos de variadas localizações, porém, para se estudar um modelo em certas localizações mais específicas essa base de dados pode não fornecer os ficheiros climáticos pretendidos e/ou os ficheiros climáticos fornecidos podem não conter valores que representem com maior exatidão o clima onde se pretende efetuar a análise. Por isso, na maioria dos estudos são criados ficheiros climáticos personalizados, de forma a ter controlo sobre que variáveis climáticas utilizar para construção do ficheiro climático, que tipo de ficheiro climático se pretende criar e com que métodos matemáticos.

Na presente dissertação pretendeu-se avaliar que tipos de ficheiros climáticos existem e que tipo de ficheiro utilizar como *input* no programa de análise higrotérmica WUFI Plus, fazendo uma revisão sobre os vários tipos de ficheiros climáticos existentes e respetivos métodos matemáticos para os contruir. Concluindo nesta fase, que o ficheiro do tipo *Moisture Reference Year* (MRY) seria o tipo de ficheiro a ser criado para o estudo, por conter nos seus métodos de construção o fator humidade, ao contrário de métodos como o *Test Reference Year* (TRY). Contudo, criar-se-á um ano representativo de um clima de condições extremas cuja repetibilidade no futuro é reduzida face ao ano representativo criado num TRY, cujo ano criado será representativo de um clima típico de se encontrar no presente e cuja repetibilidade no futuro será maior.

Após a revisão, utilizou-se o software de programação computacional, Python, para se efetuar avaliações sobre a exatidão estatística das variáveis climáticas ERA5 obtidas de uma base de dados internacional e as variáveis obtidas de uma base de dados nacional, i.e valores *in situ*, com recurso a índices estatísticos como *coefficient of determination* (R^2), *Range Normalized Root Mean Square Error* (RN_RMSE) e *Mean Bias Error* (MBE). Constatou-se que existem variáveis climáticas captadas por satélite que obtiveram resultados ótimos, como a variável temperatura, humidade relativa e radiação global, mas outras variáveis como pressão atmosférica, precipitação, velocidade e direção do vento obtiveram valores menos aceitáveis na validação dos resultados relativos à exatidão estatística dos dados climáticos.

Finalizando-se a avaliação sobre a exatidão das variáveis procede-se à correção de erros de medição. Recorrendo ao programa Python, realizaram-se interpolações lineares, *spline* cubico e inserção de valores ERA5 como substituição dos erros de medição *in situ*.

O ficheiro climático MRY foi aplicado na análise a um modelo desenhado utilizando *software* Autodesk REVIT e analisou-se o desempenho higrotérmico de um modelo computacional composto por envolventes verticais cujas soluções construtivas correspondem à maioria das construções encontradas no parque edificado português, sendo a parede de pano simples de alvenaria de tijolo cerâmico, parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico e parede resistente de alvenaria de pedra, de forma a: 1) avaliar o impacto de um clima exterior agreste, representado por um *Moisture Reference Year* (MRY) sobre o ambiente interior do modelo computacional para cada solução construtiva da envolvente vertical, 2) caracterizar energeticamente as cidades capitais de distrito de Portugal continental com base no efeito do MRY sobre o modelo computacional.

Este trabalho contribuiu para: 1) obter um maior entendimento sobre os vários ficheiros climáticos existentes, a sua aplicabilidade e que limitações estão associadas, 2) validar os valores ERA5 para serem utilizados para correção de eventuais erros de medição *in situ*, 3) Demonstrar em valores energéticos e de horas fora da temperatura interior de conforto, o impacto de uma ambiente extremo criado num MRY, como por exemplo se poderá constatar nos resultados para Bragança, cujas horas ultrapassaram os 70% fora do conforto para as três envolventes verticais e cujas necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento foram elevadas .

Palavas chave: Moisture Reference Year, variáveis climáticas, WUFI Plus, Exatidão estatística, Autodesk REVIT, performance higrotérmica.

ABSTRACT

In a thermal or hygrothermal analysis of a computational model, one of the key aspects influencing the analysis is the choice of the external climate for a given location where the model will be inserted. This climate is defined on an hourly basis in a climatic file representing a year that is representative of the location to be studied. Analysis software such as Energy Plus or WUFI Plus, among others, includes in their databases climatic files representing various locations. However, for studying a model in specific locations, this database may not provide the desired climatic files, and the provided climatic files may not accurately represent the climate for a more precise analysis. Therefore, in most studies, custom climatic files are created to have control over which climatic variables to use for the climatic file construction, what type of climatic file to create, and with what mathematical methods.

In this dissertation, the aim is to evaluate the types of climatic files available and determine the appropriate file to use as input in the hygrothermal analysis program WUFI Plus. Subsequently, applying the climatic file to analyse a model designed using Autodesk REVIT program, the hygrothermal performance of wall construction solutions representing most buildings in the Portuguese building stock will be assessed.

Firstly, a review was conducted on the types of climatic files available, the mathematical methods applied, and the types of climatic variables needed to create them. The software used for the analyses will be WUFI Plus, which operates based on certain climatic variables obtained from international and national climatic databases.

After the review, a decision was made on the type of climatic file and the method to be used to pr. The Python programming software was utilized to assess the statistical accuracy of climatic variables obtained from an international database and variables obtained from a national database using mathematical methods. Upon completing the evaluation of variable accuracy, errors in measurement were corrected using the Python program. Finally, the climatic file was created and used as input for analysing the hygrothermal performance of buildings with typical Portuguese walls.

Keywords: Climate files, climate variables, WUFI Plus, statistical validation, Autodesk REVIT, hygrothermal performance.

ÍNDICE

1	ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.1.	OBJETIVOS	2
1.2.	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	3
2	FICHEIROS CLIMÁTICOS.....	5
2.1.	DADOS CLIMÁTICOS HISTÓRICOS	5
2.1.1.	Dados climáticos – formatos de ficheiros	7
2.1.2.	Parâmetros climáticos	7
2.2.	TIPOS DE FICHEIROS CLIMÁTICOS.....	8
2.2.1.	<i>Typical Metereological Year</i>	8
2.2.2.	<i>Test Reference Year</i>	9
2.2.3.	<i>Design Reference Year</i>	9
2.2.4.	<i>Moisture Reference Year</i>	9
2.2.5.	<i>Future Typical Weather Files (FTWY)</i>	11
2.3.	MÉTODOS PARA CRIAÇÃO DE FICHEIROS CLIMÁTICOS.....	12
2.3.1.	Criação de um ficheiro <i>Typical Meteorological Years (TMY)</i>	12
2.3.2.	Criação de um ficheiro <i>Test Reference Year (TRY)</i>	16
2.3.3.	Criação de um ficheiro <i>Moisture Reference Year (MRY)</i>	18
2.3.4.	Limitações atribuídas aos ficheiros climáticos	26
3	ESCOLHA DOS LOCAIS GEOGRÁFICOS E RESPECTIVO CLIMA	27
3.1.	VALIDAÇÃO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS, COMPARAÇÃO DE DADOS MEDIDOS E SIMULADOS.....	30
3.1.1.	Método visual	31
3.1.2.	Método estatístico	35
3.2.	RESOLUÇÃO DE ERROS DE MEDIÇÃO	46
3.3.	FICHEIRO CLIMÁTICO E MODELO GEOMÉTRICO COMO <i>INPUT</i> NO WUFI PLUS.....	56
3.3.1.	MRY com recurso ao método <i>Moisture Index (MI)</i>	56
3.3.2.	Inserção do ficheiro MRY como <i>input</i> no WUFI Plus	58
3.3.3.	Importação e inserção de um modelo geométrico no WUFI Plus.....	58
4	SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS TÍPICAS DE PAREDES ENVOLVENTES EXTERIOR EM PORTUGAL.....	60
4.1.	BREVE CARACTERIZAÇÃO DO PARQUE EDIFICADO EM PORTUGAL	60
4.2.	PAREDE RESISTENTE DE ALVENARIA DE PEDRA.....	60
4.2.1.	Elemento construtivo	61
4.3.	PAREDE DUPLA DE ALVENARIA DE TIJOLO CERÂMICO FURADO	62
4.3.1.	Elemento construtivo	62
4.4.	PAREDE SIMPLES DE UM PANO DE ALVENARIA DE TIJOLO CERÂMICO FURADO	63
4.4.1.	Elemento construtivo	63
4.5.	VÃOS ENVIDRAÇADOS	64
5	ANÁLISE HIGROTÉRMICA DO MODELO COMPUTACIONAL	66
5.1.	PAREDE DE ALVENARIA DE PEDRA	68
5.1.1.	Análise sem sistemas de ventilação e AVAC	68

5.1.2.	Análise com sistemas de ventilação e AVAC.....	69
5.2.	PAREDE DE PANO SIMPLES DE TIJOLO CERÂMICO	72
5.2.1.	Análise sem sistemas de ventilação e AVAC	72
5.2.2.	Análise com sistemas de ventilação e AVAC.....	74
5.3.	PAREDE DUPLA	77
5.3.1.	Análise sem sistemas de ventilação e AVAC	77
5.3.2.	Análise com sistemas de ventilação e AVAC.....	79
5.4.	HORAS DE CONFORTO	82
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
6.1.	CONCLUSÕES	86
6.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	87
	BIBLIOGRAFIA	88
	ANEXOS	94
A.	VALIDAÇÃO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS.....	94
B.	VALIDAÇÃO DOS VALORES SIMULADOS PARA AS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS ATRAVÉS DE ÍNDICES DE EXATIDÃO	104
C.	AUTODESK REVIT PARA WUFI PLUS	107
D.	ANÁLISE HIGROTÉRMICA SEM SISTEMAS DE VENTILAÇÃO E AVAC.....	111
E.	ÍNDICES ESTATÍSTICOS.....	122

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 4.1 - LOCALIZAÇÕES DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS SELECIONADAS.	27
FIGURA 4.2 - SOBREPOSIÇÃO DE GRÁFICOS DE LINHAS DOS VALORES HORÁRIOS MEDIDOS (IPMA) E SIMULADOS (ERA5) PARA A LOCALIZAÇÃO DE SANTARÉM.	30
FIGURA 4.3 - SOBREPOSIÇÃO DE GRÁFICOS DE LINHAS DOS VALORES HORÁRIOS MEDIDOS (IPMA) E SIMULADOS (ERA5) PARA A LOCALIZAÇÃO DE LISBOA.	31
FIGURA 4.4 - SOBREPOSIÇÃO DE GRÁFICOS DE LINHAS DOS VALORES HORÁRIOS MEDIDOS (IPMA) E SIMULADOS (ERA5) PARA A LOCALIZAÇÃO DE BEJA.	34
FIGURA 4.5 - VALIDAÇÃO DOS VALORES ERA5 RELATIVAMENTE ÀS LOCALIZAÇÕES ANALISADAS, PARA A HUMIDADE RELATIVA.	43
FIGURA 4.6 - VALIDAÇÃO DOS VALORES ERA5 RELATIVAMENTE ÀS LOCALIZAÇÕES ANALISADAS, PARA A TEMPERATURA.	43
FIGURA 4.7 - VALIDAÇÃO DOS VALORES ERA5 RELATIVAMENTE ÀS LOCALIZAÇÕES ANALISADAS PARA A PRESSÃO ATMOSFÉRICA.	44
FIGURA 4.8 - VALIDAÇÃO DOS VALORES ERA5 RELATIVAMENTE ÀS LOCALIZAÇÕES ANALISADAS PARA A PRECIPITAÇÃO.	44
FIGURA 4.9 - VALIDAÇÃO DOS VALORES ERA5 RELATIVAMENTE ÀS LOCALIZAÇÕES ANALISADAS PARA A VELOCIDADE DO VENTO.	44
FIGURA 4.10 - VALIDAÇÃO DOS VALORES ERA5 RELATIVAMENTE ÀS LOCALIZAÇÕES ANALISADAS PARA A DIREÇÃO DO VENTO.	44
FIGURA 4.11 - VALIDAÇÃO DOS VALORES ERA5 RELATIVAMENTE ÀS LOCALIZAÇÕES ANALISADAS PARA A RADIAÇÃO GLOBAL.	45
FIGURA 4.12 - SOBREPOSIÇÃO DE GRÁFICOS DE LINHAS DOS VALORES HORÁRIOS MEDIDOS (IPMA) E SIMULADOS (ERA5) PARA A LOCALIZAÇÃO DE LISBOA, VARIÁVEL CLIMÁTICA DE DIREÇÃO DO VENTO (°).	47
FIGURA 4.13 - CORREÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO <i>IN SITU</i> PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA DE TEMPERATURA (°C), PARA LISBOA.	47
FIGURA 4.14 - CORREÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO <i>IN SITU</i> PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA DE HUMIDADE RELATIVA (%), LOCALIZAÇÃO DE BEJA.	49
FIGURA 4.15 - CORREÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO <i>IN SITU</i> PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA DE TEMPERATURA (°C), LOCALIZAÇÃO DE VIANA DO CASTELO.	51
FIGURA 4.16 - CORREÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO <i>IN SITU</i> PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA DE HUMIDADE RELATIVA (%), LOCALIZAÇÃO DE BRAGA.	53
FIGURA 5.1 - MODELO ENERGÉTICO 3D. CAPTADO DO PROGRAMA AUTODESK REVIT.	59
FIGURA 7.1 - REPRESENTAÇÃO DA ROSA DOS VENTOS RELATIVAMENTE À SOMA DA CHUVA INCIDENTE NA SUPERFÍCIE, PARA VISEU. CAPTADO ATRAVÉS DO PROGRAMA WUFI PLUS.	67
FIGURA 7.2 - REPRESENTAÇÃO DA ROSA DOS VENTOS RELATIVAMENTE À SOMA ANUAL DA RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE, PARA VISEU. CAPTADO ATRAVÉS DO PROGRAMA WUFI PLUS.	67
FIGURA 7.3 - MODELO 3D DIVIDIDO EM AMBIENTES INTERIORES. CAPTADO DO PROGRAMA WUFI PLUS.	67
FIGURA 7.4 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO CLIMA INTERIOR, POR HORAS, AO LONGO DO ANO DE REFERÊNCIA. CAPTADO ATRAVÉS DO PROGRAMA WUFI PLUS. “AIR” – TEMPERATURA DO AR INTERIOR. LOCALIZAÇÃO DE FARO.	68
FIGURA 7.5 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO CLIMA INTERIOR, POR HORAS, AO LONGO DO ANO DE REFERÊNCIA. CAPTADO ATRAVÉS DO PROGRAMA WUFI PLUS. “AIR” – TEMPERATURA DO AR INTERIOR. LOCALIZAÇÃO DE COIMBRA.	68

FIGURA 7.6 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO CLIMA INTERIOR, POR HORAS, AO LONGO DO ANO DE REFERÊNCIA. CAPTADO ATRAVÉS DO PROGRAMA WUFI PLUS. “AIR” – TEMPERATURA DO AR INTERIOR. LOCALIZAÇÃO DE LEIRIA.	68
FIGURA 7.7 - CARACTERIZAÇÃO DE LOCALIZAÇÕES DE PORTUGAL CONTINENTAL CORRESPONDENTE ÀS NECESSIDADES DE AQUECIMENTO ANUAIS (KWh/ANO) PARA CADA LOCALIZAÇÃO.	70
FIGURA 7.8 - CARACTERIZAÇÃO DE LOCALIZAÇÕES DE PORTUGAL CONTINENTAL CORRESPONDENTE ÀS NECESSIDADES DE ARREFECIMENTO ANUAIS (KWh/ANO) PARA CADA LOCALIZAÇÃO.....	71
FIGURA 7.9 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO CLIMA INTERIOR, POR HORAS, AO LONGO DO ANO DE REFERÊNCIA. CAPTADO ATRAVÉS DO PROGRAMA WUFI PLUS. “AIR” – TEMPERATURA DO AR INTERIOR. LOCALIZAÇÃO DE FARO.	73
FIGURA 7.10 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO CLIMA INTERIOR, POR HORAS, AO LONGO DO ANO DE REFERÊNCIA. CAPTADO ATRAVÉS DO PROGRAMA WUFI PLUS. “AIR” – TEMPERATURA DO AR INTERIOR. LOCALIZAÇÃO DE COIMBRA.....	73
FIGURA 7.11 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO CLIMA INTERIOR, POR HORAS, AO LONGO DO ANO DE REFERÊNCIA. CAPTADO ATRAVÉS DO PROGRAMA WUFI PLUS. “AIR” – TEMPERATURA DO AR INTERIOR. LOCALIZAÇÃO DE LEIRIA.	73
FIGURA 7.12 - CARACTERIZAÇÃO DE LOCALIZAÇÕES DE PORTUGAL CONTINENTAL CORRESPONDENTE ÀS NECESSIDADES DE AQUECIMENTO ANUAIS (KWh/ANO) PARA CADA LOCALIZAÇÃO.	75
FIGURA 7.13 - CARACTERIZAÇÃO DE LOCALIZAÇÕES DE PORTUGAL CONTINENTAL CORRESPONDENTE ÀS NECESSIDADES DE ARREFECIMENTO ANUAIS (KWh/ANO) PARA CADA LOCALIZAÇÃO.....	76
FIGURA 7.14 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO CLIMA INTERIOR, POR HORAS, AO LONGO DO ANO DE REFERÊNCIA. CAPTADO ATRAVÉS DO PROGRAMA WUFI PLUS. “AIR” – TEMPERATURA DO AR INTERIOR. LOCALIZAÇÃO DE BRAGANÇA.	78
FIGURA 7.15 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO CLIMA INTERIOR, POR HORAS, AO LONGO DO ANO DE REFERÊNCIA. CAPTADO ATRAVÉS DO PROGRAMA WUFI PLUS. “AIR” – TEMPERATURA DO AR INTERIOR. LOCALIZAÇÃO DE SINES.	78
FIGURA 7.16 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO CLIMA INTERIOR, POR HORAS, AO LONGO DO ANO DE REFERÊNCIA. CAPTADO ATRAVÉS DO PROGRAMA WUFI PLUS. “AIR” – TEMPERATURA DO AR INTERIOR. LOCALIZAÇÃO DE VIANA DO CASTELO.	78
FIGURA 7.17-CARACTERIZAÇÃO DE LOCALIZAÇÕES DE PORTUGAL CONTINENTAL CORRESPONDENTE ÀS NECESSIDADES DE AQUECIMENTO ANUAIS (KWh/ANO) PARA CADA LOCALIZAÇÃO.	81
FIGURA 7.18 - CARACTERIZAÇÃO DE LOCALIZAÇÕES DE PORTUGAL CONTINENTAL CORRESPONDENTE ÀS NECESSIDADES DE ARREFECIMENTO ANUAIS (KWh/ANO) PARA CADA LOCALIZAÇÃO.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS EM ANEXO

FIGURA ANEXO A 1 - LOCALIZAÇÃO DE BEJA. COMPARAÇÃO DE DADOS MEDIDOS COM SIMULADOS PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA, TEMPERATURA (°C).	94
FIGURA ANEXO A 2 - LOCALIZAÇÃO DE BRAGA. COMPARAÇÃO DE DADOS MEDIDOS COM SIMULADOS PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA, TEMPERATURA (°C).	95
FIGURA ANEXO A 3 - LOCALIZAÇÃO DE BRAGANÇA. COMPARAÇÃO DE DADOS MEDIDOS COM SIMULADOS PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA TEMPERATURA (°C).	95
FIGURA ANEXO A 4 - LOCALIZAÇÃO DE CASTELO BRANCO. COMPARAÇÃO DE DADOS MEDIDOS COM SIMULADOS PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA, TEMPERATURA (°C).	96
FIGURA ANEXO A 5 - LOCALIZAÇÃO DE COIMBRA. COMPARAÇÃO DE DADOS MEDIDOS COM SIMULADOS PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA TEMPERATURA (°C).	96
FIGURA ANEXO A 6 - LOCALIZAÇÃO DE ÉVORA. COMPARAÇÃO DE DADOS MEDIDOS COM SIMULADOS PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA, TEMPERATURA (°C).	97
FIGURA ANEXO A 7 - LOCALIZAÇÃO DE FARO. COMPARAÇÃO DE DADOS MEDIDOS COM SIMULADOS PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA, TEMPERATURA (°C).	97
FIGURA ANEXO A 8 - LOCALIZAÇÃO DE SINES. COMPARAÇÃO DE DADOS MEDIDOS COM SIMULADOS PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA TEMPERATURA (°C).	98
FIGURA ANEXO A 9 - LOCALIZAÇÃO DE BEJA. COMPARAÇÃO DE DADOS MEDIDOS COM SIMULADOS PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA, VELOCIDADE DO VENTO (M/S). AZUL - DADOS ERA5; VERMELHO - DADOS IPMA; AMARELO - MÉDIA MÓVEL MENSAL IPMA; PRETO - MÉDIA MOVEL MENSAL ERA5.	98
FIGURA ANEXO A 10 - LOCALIZAÇÃO DE BRAGANÇA. COMPARAÇÃO DE DADOS MEDIDOS COM SIMULADOS PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA, VELOCIDADE DO VENTO (M/S).	99
FIGURA ANEXO A 11- LOCALIZAÇÃO DE CASTELO BRANCO. COMPARAÇÃO DE DADOS MEDIDOS COM SIMULADOS PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA, VELOCIDADE DO VENTO (M/S).	99
FIGURA ANEXO A 12 - LOCALIZAÇÃO DE COIMBRA. COMPARAÇÃO DE DADOS MEDIDOS COM SIMULADOS PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA, VELOCIDADE DO VENTO (M/S).	100
FIGURA ANEXO A 13 - LOCALIZAÇÃO DE ÉVORA. COMPARAÇÃO DE DADOS MEDIDOS COM SIMULADOS PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA, VELOCIDADE DO VENTO (M/S).	100
FIGURA ANEXO A 14 - LOCALIZAÇÃO DE FARO. COMPARAÇÃO DE DADOS MEDIDOS COM SIMULADOS PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA, VELOCIDADE DO VENTO (M/S).	101
FIGURA ANEXO A 15 - LOCALIZAÇÃO DE SINES. COMPARAÇÃO DE DADOS MEDIDOS COM SIMULADOS PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA, VELOCIDADE DO VENTO (M/S).	101
FIGURA ANEXO C 1-SELEÇÃO DE “SPACES & ZONES”. CAPTURADO DO PROGRAMA AUTODESK REVIT.	107
FIGURA ANEXO C 2-SELEÇÃO DO CÁLCULO DE AREAS E VOLUMES CONFINADOS AO ACABAMENTO DAS ENVOLVENTES DAS DIVISÕES INTERIORES. CAPTURO DO PROGRAMA AUTODESK REVIT.	107
FIGURA ANEXO C 3- DEMONSTRAÇÃO DO SEPARADOR POR ONDE EXTRAIR O MODELO 3D NUM FICHEIRO ADAPTADO PARA SER INSERIDO NO WUFI PLUS. CAPTURADO DO PROGRAMA AUTODESK REVIT.	108
FIGURA ANEXO C 4 - MODELO 3D, DESENHADO A PARTIR DAS DIMENSÕES DO PROJETO DE ARQUITETURA. CAPTURADO DO PROGRAMA AUTODESK REVIT.	108
FIGURA ANEXO C 5-DEFINIÇÃO DOS “ROOMS” PARA DEFINIÇÃO DAS DIVISÕES INTERIORES. CAPTURADO DO PROGRAMA AUTODESK REVIT.	109
FIGURA ANEXO C 6-DEFINIÇÃO DOS “SPACES” PARA DEFINIÇÃO DOS VOLUMES A CALCULAR PARA AS DIVISÕES INTERIORES. CAPTURADO DO PROGRAMA AUTODESK REVIT.	109
FIGURA ANEXO C 7 - MODELO ENERGÉTICO 3D. CAPTURADO DO PROGRAMA AUTODESK REVIT.	110
FIGURA ANEXO C 8-DEMONSTRAÇÃO DA FASE FINAL DE EXPORTAÇÃO DO MODELO 3D NUM FICHEIRO DE FORMATO GBXML. CAPTURADO DO PROGRAMA AUTODESK REVIT.	110

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 4.1 - REPRESENTAÇÃO DAS COORDENADAS REFERENTES ÀS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS IPMA E REFERENTES AO ERA5.	28
TABELA 4.2 - QUANTIFICAÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO DOS DADOS CLIMÁTICOS IPMA EM QUANTIDADE DE HORAS, REFERENTES AOS OITO ANOS DE DADOS HORÁRIOS. T – TEMPERATURA; HR – HUMIDADE RELATIVA; PATM – PRESSÃO ATMOSFÉRICA; PRECIPITAÇÃO; VEL.VENTO – VELOCIDADE DO VENTO; DIR. VENTO – DIREÇÃO DO VENTO; RG – RADIAÇÃO GLOBAL.....	29
TABELA 4.3 - QUANTIFICAÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO DOS DADOS CLIMÁTICOS IPMA EM PORCENTAGEM, REFERENTES A OITO ANOS DE DADOS HORÁRIOS. T – TEMPERATURA; HR – HUMIDADE RELATIVA; PATM – PRESSÃO ATMOSFÉRICA; PRECIPITAÇÃO; VEL.VENTO – VELOCIDADE DO VENTO; DIR. VENTO – DIREÇÃO DO VENTO; RG – RADIAÇÃO GLOBAL.	29
TABELA 4.4 - CÁLCULO DA MÉDIA E MEDIANA PARA OS VALORES HORÁRIOS DA TEMPERATURA PROVENIENTES DO IPMA E ERA5.....	32
TABELA 4.5 - CÁLCULO DAS DIFERENÇAS DE MÉDIA DE TEMPERATURA PARA AS ESTAÇÕES CLIMÁTICAS DE CADA ANO. .	33
TABELA 4.6 - CÁLCULO DA DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURAS MÁXIMA E MÍNIMA PARA OS VALORES MEDIDOS E SIMULADOS, PARA CADA ANO E CORRESPONDENTES ESTAÇÕES CLIMÁTICAS.....	33
TABELA 4.7 - CÁLCULO DA MÉDIA E MEDIANA PARA OS VALORES HORÁRIOS DA HUMIDADE RELATIVA PROVENIENTES DO IPMA E ERA5.	34
TABELA 4.8 - CÁLCULO DAS DIFERENÇAS DE MÉDIA DE HUMIDADE RELATIVA PARA AS ESTAÇÕES CLIMÁTICAS DE CADA ANO.	35
TABELA 4.9 - CÁLCULO DOS ÍNDICES DE EXATIDÃO ENTRE OS VALORES REGISTADOS <i>IN SITU</i> E OS VALORES SIMULADOS, PARA CADA VARIÁVEL CLIMÁTICA. REGIÃO NORTE DE PORTUGAL CONTINENTAL	37
TABELA 4.10 - CÁLCULO DOS ÍNDICES DE EXATIDÃO ENTRE OS VALORES REGISTADOS <i>IN SITU</i> E OS VALORES SIMULADOS, PARA CADA VARIÁVEL CLIMÁTICA. REGIÃO CENTRO DE PORTUGAL CONTINENTAL	39
TABELA 4.11 - CÁLCULO DOS ÍNDICES DE EXATIDÃO ENTRE OS VALORES REGISTADOS <i>IN SITU</i> E OS VALORES SIMULADOS, PARA CADA VARIÁVEL CLIMÁTICA. REGIÃO DE LISBOA E ALTO ALENTEJO DE PORTUGAL CONTINENTAL	40
TABELA 4.12 - CÁLCULO DOS ÍNDICES DE EXATIDÃO ENTRE OS VALORES REGISTADOS <i>IN SITU</i> E OS VALORES SIMULADOS, PARA CADA VARIÁVEL CLIMÁTICA. REGIÃO SUL DE PORTUGAL CONTINENTAL.....	42
TABELA 4.13 – CÁLCULO DA MÉDIA, MEDIANA, MÁXIMO E MÍNIMO PARA OS OITO ANOS DE VALORES PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA TEMPERATURA, RELATIVAMENTE AOS VALORES IPMA, ERA5 E CORRIGIDOS IPMA+ERA5 PARA LISBOA.	48
TABELA 4.14 – COMPARAÇÃO ENTRE VALORES IPMA, ERA5 E IPMA+ERA5 PARA CADA ANO DE DADOS HORÁRIOS ANALISADO PARA LISBOA.	48
TABELA 4.15 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES IPMA, ERA5 E IPMA+ERA5 PARA CADA ANO DE DADOS HORÁRIOS ANALISADO E RESPECTIVAS ESTAÇÕES CLIMÁTICAS PARA LISBOA.	49
TABELA 4.16 - CÁLCULO DA MÉDIA, MEDIANA, MÁXIMO E MÍNIMO PARA OS OITO ANOS DE VALORES PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA HUMIDADE RELATIVA, RELATIVAMENTE AOS VALORES IPMA, ERA5 E CORRIGIDOS IPMA+ERA5 PARA BEJA.	50
TABELA 4.17– COMPARAÇÃO ENTRE VALORES IPMA, ERA5 E IPMA+ERA5 PARA CADA ANO DE DADOS HORÁRIOS ANALISADO PARA BEJA.....	50
TABELA 4.18 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES IPMA, ERA5 E IPMA+ERA5 PARA CADA ANO DE DADOS HORÁRIOS ANALISADO E RESPECTIVAS ESTAÇÕES CLIMÁTICAS PARA BEJA.	51
TABELA 4.19 - CÁLCULO DA MÉDIA, MEDIANA, MÁXIMO E MÍNIMO PARA OS OITO ANOS DE VALORES PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA TEMPERATURA, RELATIVAMENTE AOS VALORES IPMA, ERA5 E CORRIGIDOS IPMA+ERA5 PARA VIANA DO CASTELO.	51
TABELA 4.20- COMPARAÇÃO ENTRE VALORES IPMA, ERA5 E IPMA+ERA5 PARA CADA ANO DE DADOS HORÁRIOS ANALISADO PARA VIANA DO CASTELO.	52
TABELA 4.21- COMPARAÇÃO ENTRE VALORES IPMA, ERA5 E IPMA+ERA5 PARA CADA ANO DE DADOS HORÁRIOS ANALISADO E RESPECTIVAS ESTAÇÕES CLIMÁTICAS PARA VIANA DO CASTELO.....	53
TABELA 4.22 - CÁLCULO DA MÉDIA, MEDIANA, MÁXIMO E MÍNIMO PARA OS OITO ANOS DE VALORES PARA A VARIÁVEL CLIMÁTICA HUMIDADE RELATIVA, RELATIVAMENTE AOS VALORES IPMA, ERA5 E CORRIGIDOS IPMA+ERA5 PARA BRAGA.....	54

TABELA 4.23 – COMPARAÇÃO ENTRE VALORES IPMA, ERA5 E IPMA+ERA5 PARA CADA ANO DE DADOS HORÁRIOS ANALISADO PARA BRAGA.	54
TABELA 4.24 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES IPMA, ERA5 E IPMA+ERA5 PARA CADA ANO DE DADOS HORÁRIOS ANALISADO E RESPECTIVAS ESTAÇÕES CLIMÁTICAS PARA BRAGA.....	55
TABELA 5.1- CÁLCULO E RESULTADO DO <i>MOISTURE INDEX</i> (MI) PARA A LOCALIZAÇÃO DE LISBOA.....	57
TABELA 5.2– LOCALIZAÇÕES SELECIONADAS COM RESPECTIVOS MI E ANO DECLARADO COMO REFERÊNCIA, MRY.....	58
TABELA 6.1 - PROPRIEDADES BÁSICAS CORRESPONDENTES AOS MATERIAIS QUE COMPÕEM O ELEMENTO CONSTRUTIVO. VALORES RETIRADOS DA BIBLIOTECA DO WUFI PLUS.	61
TABELA 6.2-PROPRIEDADES BÁSICAS CORRESPONDENTES AOS MATERIAIS QUE COMPÕEM O ELEMENTO CONSTRUTIVO. VALORES RETIRADOS DA BIBLIOTECA DO WUFI PLUS. ELEMENTO CONSTRUTIVO QUE COMPÕE A PAREDE DUPLA DE ALVENARIA DE TIJOLO CERÂMICO.....	63
TABELA 6.3 - VALORES RETIRADOS DA BIBLIOTECA DO WUFI PLUS. ELEMENTO CONSTRUTIVO QUE COMPÕE A PAREDE SIMPLES DE UM PANO DE ALVENARIA DE TIJOLO CERÂMICO.	64
TABELA 7.1 - TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA MÁXIMA, MÍNIMA E MÉDIA APÓS LEITURA DO FICHEIRO CLIMÁTICO INSERIDO NO <i>SOFTWARE</i> WUFI PLUS. AMBIENTE EXTERIOR.	66
TABELA 7.2 - APRESENTAÇÃO DE TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA PARA TODAS AS LOCALIZAÇÕES EM ESTUDO, APÓS ANÁLISE EFETUADA ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES NO PROGRAMA WUFI PLUS, PARA A ENVOLVENTE VERTICAL DE PAREDE DE ALVENARIA DE PEDRA ORDINÁRIA.	69
TABELA 7.3 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS SOBRE A SIMULAÇÃO EFETUADA PELO PROGRAMA WUFI PLUS, ACERCA DAS NECESSIDADES DE AQUECIMENTO E ARREFECIMENTO PARA AS LOCALIZAÇÕES EM ESTUDO.....	70
TABELA 7.4 - RESULTADOS RELATIVOS AOS CÁLCULOS DOS CONSUMOS ENERGÉTICOS TOTAIS.	72
TABELA 7.5 - APRESENTAÇÃO DE TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA PARA TODAS AS LOCALIZAÇÕES EM ESTUDO, APÓS ANÁLISE EFETUADA ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES NO PROGRAMA WUFI PLUS, PARA A ENVOLVENTE VERTICAL DE PAREDE DE ALVENARIA DE TIJOLO CERÂMICO.....	74
TABELA 7.6 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS SOBRE A SIMULAÇÃO EFETUADA PELO PROGRAMA WUFI PLUS, ACERCA DAS NECESSIDADES DE AQUECIMENTO E ARREFECIMENTO PARA AS LOCALIZAÇÕES EM ESTUDO.....	75
TABELA 7.7 - RESULTADOS RELATIVOS AOS CÁLCULOS DOS CONSUMOS ENERGÉTICOS TOTAIS.	77
TABELA 7.8 - APRESENTAÇÃO DE TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA PARA TODAS AS LOCALIZAÇÕES EM ESTUDO, APÓS ANÁLISE EFETUADA ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES NO PROGRAMA WUFI PLUS, PARA A ENVOLVENTE VERTICAL DE PAREDE DUPLA DE ALVENARIA CERÂMICA.....	79
TABELA 7.9 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS SOBRE A SIMULAÇÃO EFETUADA PELO PROGRAMA WUFI PLUS, ACERCA DAS NECESSIDADES DE AQUECIMENTO E ARREFECIMENTO PARA AS LOCALIZAÇÕES EM ESTUDO.....	80
TABELA 7.10 - RESULTADOS RELATIVOS AOS CÁLCULOS DOS CONSUMOS ENERGÉTICOS TOTAIS.	82
TABELA 7.11 - APRESENTAÇÃO DA QUANTIDADE ACUMULADA DE HORAS ABAIXO DA TEMPERATURA INTERIOR DE CONFORTO DE 18°C, PARA TODAS AS LOCALIZAÇÕES ANALISADAS.	83
TABELA 7.12 - APRESENTAÇÃO DA QUANTIDADE ACUMULADA DE HORAS ACIMA DA TEMPERATURA INTERIOR DE CONFORTO DE 25°C, PARA TODAS AS LOCALIZAÇÕES ANALISADAS.	83
TABELA 7.13 - CONTABILIZAÇÃO TOTAL E HORAS FORA DOS LIMITES DE TEMPERATURA DE CONFORTO.	84

ÍNDICE DE TABELAS EM ANEXO

TABELA ANEXO B 1 - RESULTADOS DOS ÍNDICES DE EXATIDÃO ESTATÍSTICA PARA A COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS MEDIDAS (IPMA) COM SIMULADAS (ERA5). T – TEMPERATURA, HR – HUMIDADE RELATIVA, PATM – PRESSÃO ATMOSFÉRICA, VEL. VENTO – VELOCIDADE DO VENTO, DIR. VENTO – DIREÇÃO DO VENTO, RG – RADIAÇÃO GLOBAL.....	104
--	-----

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

<i>Finkelstein-Schafer statistic</i> (2.1).....	14
<i>Weighting fator para Finkelstein-Schafer statistic</i> (2.2).....	14
Raiz quadrada da diferença (RMSD) (2.3).....	14
Parâmetro residual (2.4).....	15
Média padronizada (2.5).....	15
Desvio padrão estandardizado (2.6).....	15
Valor máximo entre média padronizada e desvio padrão estandardizado (2.7).....	16
Valor residual padrão (2.8).....	16
Valor residual padronizado (2.9).....	16
Valor residual padrão (2.10).....	19
<i>Cumulative distribution function</i> (2.11).....	19
CDF das médias diárias para cada mês do calendário, para cada ano (2.12).....	19
<i>Finkelstein-Schafer statistic</i> (2.13).....	22
<i>Climatic Index</i> (2.14).....	22
<i>Wind Driven Rain</i> (2.15).....	22
<i>Annual potential evaporation</i> (2.16).....	23
<i>RHT index</i> (2.17).....	23
Média da diferença entre o limite de saturação e a humidade absoluta do ar (2.18).....	23
Limite de saturação do ar (2.19).....	23
Concentração do vapor de água (2.20).....	24
<i>Mould Index</i> (2.21).....	24
Tempo necessário para a iniciação do crescimento de fungos (2.22).....	25
Tempo de crescimento de fungos após fase inicial (2.23).....	25
<i>Drying Index</i> (2.24).....	25
Diferença entre o limite de saturação e a humidade à condição ambiente (2.25).....	26
<i>Normalization scheme</i> (2.26).....	26
<i>Moisture Index</i> (2.27).....	26
<i>RHT Severity Index</i> (2.28).....	26
<i>Severity Index</i> (2.29).....	26
<i>Drying Index</i> (Cálculo para MI) (3.1).....	57
Temperatura corrigida (3.2).....	57
Temperatura equivalente (3.3).....	57

Siglas e Acrónimos

NOMENCLATURA	
API	<i>Application Programming Interface</i>
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CDS	<i>Climate Data Store</i>
CI	<i>Climatic Index</i>
CSV	<i>comma-separated values</i>
C3S	<i>Copernicus Climate Change Service</i>
Dir.Vento	<i>Direção do vento</i>
DSY	<i>Design Summer Years</i>
ECMWF	<i>European Center of Medium-Range Forecast</i>
EP	<i>Energy Plus</i>
ERA5	<i>European Center of Medium-Range Forecast Reanalysis v5</i>
FS	<i>Finkelstein-Schafer statistic</i>
FTWY	<i>Future Typical Weather Files</i>
GDPFS	<i>Global Data-Processing and Forecast System</i>
HDF	<i>Hierarchical Data Format</i>
HR	<i>Húmidade relativa</i>
HSY	<i>Hot Summer Years</i>
HWE	<i>Heatwave Events</i>
IFS	<i>Integrated Forecast System</i>
IPMA	<i>Instituto Português do Mar e da Atmosfera</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
MBE	<i>Mean Bias Error</i>
MC	<i>Moisture content</i>
MI	<i>Moisture Index</i>
MRY	<i>Moisture Reference Year</i>
NetCDF	<i>Network Common Data Form</i>
Patm	<i>Pressão atmosférica</i>
Precip	<i>Precipitação</i>
RG	<i>Radiação global</i>
RNRMSE	<i>Range Normalized Root Mean Square Error</i>
SD	<i>Saturation deficit</i>
T	<i>Temperatura</i>
TMM	<i>Typical Meteorological Month</i>
TMY	<i>Typical Meteorological Year</i>
TRY	<i>Test Reference Years</i>
TWY	<i>Typical Weather Years</i>
Vel.Vento	<i>Velocidade do vento</i>
WDR	<i>Wind driven rain</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
WYEC	<i>Weather years for energy calculation</i>

INTRODUÇÃO

1 Enquadramento do tema

Numa análise higrotérmica a um edifício é fundamental definir o clima exterior onde se pretende localizar o edifício em estudo. Para se poder efetuar uma análise mais próxima possível da realidade, cujos resultados simulam os efeitos do clima exterior sobre o clima interior do edifício, é importante definir um clima exterior que se assimile com maior exatidão às condições climáticas expectáveis de se encontrar na realidade. Para tal, criam-se ficheiros climáticos representativos do clima exterior de modo a ter um maior controlo sobre o clima que se está a obter e o ficheiro climático que se vai construir recorrendo a variáveis climáticas medidas *in situ* e medidas através de simulações. A escolha do tipo de ficheiro climático a utilizar é importante para a definição do tipo de clima se pretende criar, pois cada tipo de ficheiro climático tem o seu método matemático de criação do ano de referência, obtendo-se, consequentemente, climas diferentes. Existem métodos para criação de ficheiros climáticos que estão estabelecidos em normas. No entanto, existem outros métodos que ainda não estão estabelecidos em normas por não haver um consenso sobre quais dos métodos são mais indicados para a criação de um ano representativo [1].

Ficheiros climáticos como *Test Reference Year* (TRY) e *Typical Meteorological Year* (TMY) são criados com base na temperatura do ar exterior, radiação global e humidade relativa [2]. Por isso, estes ficheiros não têm em conta um fator dominante na degradação das envolventes dos edifícios, i.e a humidade. Pretende-se na presente dissertação a criação de um ficheiro climático diferente dos que estão normalizados, a criação de um *Moisture Reference Year* (MRY), para a definição de um clima exterior representativo de um ano em horas, pois este ficheiro contempla o fator humidade na sua criação [3], procurando-se assim a definição de um ano de referência que contemple variações mais acentuadas das condições climáticas, tornando assim o clima mais extremo. Para a criação do ficheiro climático é necessário obter variáveis climáticas necessárias para o funcionamento do método matemático utilizado para a criação de um MRY e as variáveis obrigatórias para o funcionamento do *software* WUFI Plus. As variáveis foram obtidas através de medições *in situ*, recorrendo-se ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) para o fornecimento dos dados disponíveis, e simulados computacionalmente através de um processo de assimilação de dados recorrendo-se ao *European Center of Medium-Range Forecast* (ECMWF) para obtenção dos dados.

A análise à performance higrotérmica do edifício foi efetuada, modelando um edifício com paredes, cujas soluções construtivas são comuns de se encontrar no parque edificado do território português. A definição das soluções construtivas das diferentes paredes foi efetuada com base nos censos de 2021, identificando-se as tipologias de edifícios que existem em Portugal, i.e cruzando a informação relativa aos anos correspondentes à realização da construção dos edifícios com as arquiteturas típicas desses anos, retirando-se uma conclusão sobre as soluções construtivas mais prováveis de terem sido utilizadas na execução das paredes dos edifícios.

Obtendo-se os tipos de paredes típicas em Portugal continental, modelou-se o edifício como caso de estudo. Primeiramente modelou-se a geometria no programa Autodesk REVIT, criando-se um edifício com 2 pisos que de seguida foi adaptado a ser utilizado como *input* no programa WUFI Plus. Realizaram-se simulações para cada tipo de envolvente vertical implementando-se o modelo no clima exterior construído no ficheiro climático definido em um ano horário de referência.

1.1. Objetivos

A presente dissertação consiste em identificar os tipos de ficheiros climáticos existentes e que métodos podem ser aplicados para a criação dos mesmos. Após esta revisão pretende-se selecionar o tipo de ficheiro climático que proporciona um clima, cujo método aplicado tem em conta a humidade. Selecionado o tipo de ficheiro climático a ser criado, obtêm-se as variáveis climáticas necessárias para a criação do ficheiro e para o funcionamento do *software* WUFI Plus. Tendo sido fornecido oito anos de dados climáticos horários, de 2015 a 2022, medidos *in situ* pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera, para dezoito capitais de distrito, e obtiveram-se os mesmos anos em dados simulados, fornecidos pelo *European Center of Medium-Range Forecast*.

Seguidamente, são efetuadas comparações relativas às variáveis obtidas das diferentes fontes, comparando-se os dados simulados com os dados medidos *in situ* utilizando-se métodos visuais e métodos estatísticos, através de programação computacional com recurso ao *software* Python. Foram obtidas nove variáveis climáticas relativas a dezassete localizações de Portugal continental, uma localização por distrito, de forma a caracterizar a maioria do território português.

Obtendo-se os resultados das comparações dos dados climáticos entre simulados e medidos, procede-se à identificação e correção dos erros de medição *in situ* através de interpolações estatísticas ou substituição direta de valores recorrendo, novamente, ao programa Python.

Efetuada as correções procede-se à criação do ficheiro climático, retratando o clima exterior em um ano representativo de dados climáticos horários.

A análise higrotérmica é efetuada sobre um modelo geométrico desenhado recorrendo ao *software* de modelação 3D, o Autodesk Revit, e convertido em modelo computacional apto a ser lido e reproduzido pelo programa WUFI Plus, selecionando-se para análise a zona do modelo computacional cuja incidência de radiação será mais intensa pois será a que terá maiores captações de radiação, constatando-se que se trata da zona orientada a sudoeste. É analisado o ambiente interior do modelo computacional para cada uma das dezassete localizações em três casos de estudo diferentes: 1) parede simples de um pano de alvenaria de tijolo furado sem sistemas de ventilação e de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC); 2) parede dupla de dois panos de alvenaria de tijolo maciço sem sistemas de ventilação e AVAC; 3) Parede resistente de pedra sem sistemas de ventilação e AVAC; 4) parede simples de um pano de alvenaria de tijolo furado com sistemas de ventilação e AVAC; 5) parede dupla de dois panos de alvenaria de tijolo maciço com sistemas de ventilação e AVAC; e 6) parede resistente de pedra com sistemas de ventilação e AVAC. Tendo como objetivo a análise da performance higrotérmica do edifício quando introduzido num clima exterior agressivo quanto às variações das condições climáticas. Realizaram-se 102 simulações higrotérmicas, pretendendo-se obter resultados relativos às variações de temperatura e de humidade relativa no interior do edifício para as situações sem sistemas de climatização e obtenção das necessidades de aquecimento e arrefecimento para as simulações com sistemas de climatização.

O objetivo da presente dissertação foi validar os dados climáticos ERA5 como complementos aos dados fornecidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera, usando-os como bons substitutos dos erros de medição *in situ*. Criando um ficheiro climático MRY, analisar a sua aplicabilidade no *software* WUFI Plus, analisando o ambiente interior de um modelo computacional de forma a caracterizar Portugal continental segundo a maioria das capitais de distrito do país, no que relaciona os efeitos de um clima extremo representativo de cada localidade sobre o ambiente interior, retirando-se conclusões sobre a quantidade de horas fora das temperaturas interiores de conforto e necessidades de aquecimento e arrefecimento para garantir as temperaturas de conforto no ambiente interior.

1.2. Organização do documento

A presente dissertação é composta por nove capítulos, sendo que o primeiro capítulo é o capítulo presente.

O segundo capítulo consiste numa revisão e definição, dos tipos de dados climáticos estão disponíveis, das fontes utilizadas na presente dissertação para obtenção de dados climáticos, dos tipos de formatos de ficheiros climáticos revistos para o caso em estudo e definição dos mesmos e os parâmetros climáticos necessários para o programa WUFI Plus funcionar.

O terceiro capítulo apresenta uma revisão sobre os tipos de ficheiros climáticos existentes e que métodos existem para a criação dos mesmos. Resumindo-se a maioria dos métodos e ficheiros climáticos existentes, na presente dissertação.

O quarto capítulo é relativo à escolha dos locais geográficos para a definição dos vários climas. Comparando-se as variáveis climáticas obtidas para as dezassete localizações escolhidas para o caso de estudo e validando-se as variáveis climáticas obtidas através de métodos visuais e estatísticos. É efetuada uma análise crítica aos resultados obtidos pelas comparações e procede-se à correção dos erros de medição.

O quinto capítulo apresenta que tipo de ficheiro climático e método matemático escolhido para a construção do ano de referência, representativo do clima exterior a utilizar para as simulações higrotérmicas e que formato de ficheiro é necessário construir para a introdução do ficheiro climático e do modelo geométrico no programa WUFI Plus.

O sexto capítulo é relativo à definição de que tipo de solução construtiva é comumente encontrada nas envolventes verticais do parque edificado em Portugal, descrição dos materiais de construção que constituem a solução construtiva e propriedades correspondentes.

O sétimo capítulo é referente à análise da performance higrotérmica do modelo computacional através do *software* WUFI Plus, analisando-se o modelo em cada clima estabelecido para cada localização em estudo e apresentação dos resultados relativos às variações de temperatura e humidade relativa no clima interior e necessidades de aquecimento e arrefecimento.

O oitavo capítulo, apresenta-se as conclusões relativas aos resultados sobre o caso de estudo e recomendações para trabalhos futuros.

2 Ficheiros climáticos

Para a realização de um estudo higrotérmico através de simulações computacionais com recurso a *softwares* destinados para tal objetivo, é comum a utilização de parâmetros climáticos horários para a caracterização de um clima, dependendo do time step do ficheiro climático que se está a utilizar e do *software* de simulação higrotérmica, tal como, o WUFI Plus. Os dados utilizados são normalmente referentes a um intervalo de tempo com cerca de trinta anos históricos, com parâmetros adequados ao tipo de estudo que queremos realizar e tipo de ficheiro climático a construir. Existem várias exigências a cumprir no momento de decidir que parâmetros escolher, estando dependente dos requisitos relacionados com as variáveis climáticas para o *software* que se utilizará para as análises pretendidas e do tipo de ficheiro climático que se pretende construir, bem como, o método que será utilizado para a obtenção do ficheiro.

A utilização de um conjunto de anos de dados climáticos, e.g trinta anos, para utilização num estudo, mostrar-se-ia um processo bastante moroso e complexo. Assim, criaram-se métodos para construir ficheiros climáticos que sintetizassem esse intervalo de tempo de dados climáticos em apenas um intervalo de tempo mais reduzido de anos denominado de anos referência e.g, um ano referência.

Posto isto, instituições de vários países têm vindo a criar ficheiros climáticos, construídos através de métodos matemáticos, sintetizando as variáveis climáticas históricas dos anos passados em anos de referência, a partir de dados climáticos recolhidos através das estações meteorológicas, combinando-os se necessário com dados simulados através de satélites. Ficheiros climáticos, tais como *German Test Reference Years* (TRY 2017) da Alemanha, *Chinese Standard Weather Data* (CSWD) da China, ou *Typical Meteorological Year* (TMY3) dos EUA [4], *Weather years for energy calculation* (WYEC), *Moisture Reference Year* (MRY), *Design Summer Years* (DSY), *Hot Summer Years* (HSY).

Os ficheiros climáticos podem ser criados através de *softwares* específicos, tais como *Meteonorm*, *Climate Consultant*, *WASP Climate Analyst*, entre outros. Estes *softwares* costumam ter uma base de dados climáticos que usam para gerar os ficheiros climáticos, ou criados a partir do acesso a variáveis climáticas, e.g., temperatura, humidade relativa, radiação global, obtidos de bases de dados gratuitas, e.g., *ERA5-Land hourly*. Processando-os através de métodos normalizados para a criação de ficheiros, com a recurso a *softwares* de programação computacional tais como, por exemplo, Python ou Matlab, que após a sua criação são transformados num formato adequado para ser utilizado em *softwares* de análise térmica ou higrotérmica e.g *Energy Plus*, *WUFI*.

Atualmente, muitos ficheiros dos climáticos existentes são privados, ao que ter-se-á de comprar para os adquirir, como é o caso do *software* *Meteonorm* que produzem os próprios ficheiros climáticos. No entanto, existem programas de simulação térmica tal como, *Energy Plus* (EP) que têm a sua própria base de dados de parâmetros climáticos, disponibilizando-os de forma gratuita. Contudo ficheiros como estes são escassos na representatividade de variadas localizações, por exemplo, o WUFI apenas tem um ficheiro climático para a localização de Lisboa na sua base de dados, e poderão não ser tão exatos como um ficheiro climático criado de raiz por um utilizador, quanto aos valores que apresentam relativamente aos valores que seriam mais aproximados da realidade. No presente trabalho foram criados vários tipos de ficheiros climáticos, combinando variáveis climáticas obtidas por várias fontes para responder ao objetivo de efetuar análises em vários locais de Portugal continental, por garantir uma maior flexibilidade na escolha de que variáveis a utilizar e de que fontes as obter e por ter-se um controlo sobre os níveis de exatidão estatística das variáveis climáticas obtidas.

2.1. Dados climáticos históricos

Os dados climáticos são informações registadas a partir de infraestruturas i.e estações climatológicas, capacitadas com equipamentos para a medição de várias componentes climáticas que constituem o clima de uma dada região geográfica [5]. É nas estações climatológicas que são registadas as variáveis climáticas a partir de instrumentos registadores, podendo ser disponibilizadas horariamente [5], posteriormente esses dados são enviados e analisados em estações meteorológicas.

A *World Meteorological Organization* (WMO) que decidiu criar, nos anos 60, uma rede mundial de partilha de informação climática para uma maior ajuda na observação e previsão dos climas regionais em todo o globo [6], a partir do chamado *Global Data-Processing and Forecast System* (GDPFS). Com o passar dos anos, a constante evolução tecnológica levou à criação de centros meteorológicos por todo o mundo denominados de *Regional Meteorological Specialized Centers* que criam modelos numéricos climáticos com sistemas de previsão climatológica.

Uma das entidades que contribuem para a WMO é o *European Center of Medium-Range Forecast* (EC-MWF), sendo um instituto de investigação e de prestação de serviços como previsões climáticas entre outros tipos de dados requisitados pelos estados-membros da União Europeia. O *Copernicus Climate Change Service* (C3S) faz parte do programa espacial da União Europeia sendo um departamento incorporado no ECMWF, tem como função recolher, processar e divulgar informação climatológica através de uma base de dados nomeada de *Climate Data Store* (CDS) onde o utilizador pode aceder via *online* e fazer o descarregamento das variáveis climáticas que necessitar, sendo estas disponibilizadas num formato de ficheiro do tipo NetCDF e GRIB.

As informações climáticas são recolhidas com recurso a cerca de noventa satélites, que recolhem informação diária. No entanto, a ECMWF também recebe informações climáticas de todo o tipo de fontes não-satélite, incluindo sensores instalados em terra, mar, e através de aeronaves especializadas. Após a recolha dos dados, procedesse a métodos numéricos de assimilação de dados para efetuar previsões climáticas, posteriormente toda a informação recolhida é arquivada numa base de dados podendo ser, como já mencionado, acedida por terceiros. Os dados climáticos arquivados (históricos), são usados para analisar as alterações climáticas, para tais dados é atribuído o nome de *reanalysis*, estes são também utilizados para qualquer tipo de estudo envolvendo o impacto do clima e serão usados para a presente dissertação.

ECMWF Reanalysis v5 (ERA5)

A quinta geração de *reanalysis* da ECMWF é denominado por ERA5, contendo dados climáticos horários arquivados deste janeiro de 1940 até ao presente. As variáveis são disponibilizadas nos formatos de ficheiro identificados anteriormente, este tipo de formato de ficheiro comprime uma complexidade de informações em metadados, arquivados numa base de dados CDS, em formato de grelha espacial¹ em parâmetros de longitude e latitude, com cerca de trinta quilómetros de cobertura geográfica, e.g um ficheiro NetCDF para a localidade de Lisboa significará que a grelha espacial abrange um plano com trinta quilómetros para a vertical e para a horizontal.

O ERA5 é produzido através de um sistema computacional de assimilação² de dados, nomeado de 4D-Var, e do modelo de previsão climática do sistema IFS (*Integrated Forecast System*).

O 4D-Var é uma técnica em quatro dimensões, que aplica uma interpolação estatística no espaço e no tempo entre as informações meteorológicas recolhidas e uma estimativa meteorológica (previsão) executada previamente.

Open-meteo

O *Open-meteo* é uma base de dados de acesso gratuito criada a partir da iniciativa do C3S, que dispõe dos mesmos dados climáticos ERA5 disponíveis no CDS. Tem como objetivo facilitar o acesso aos dados climáticos reduzindo a quantidade de variáveis disponíveis, apresentando as mais comumente requisitadas pelos utilizadores, e simplifica a interface de definição da localidade pretendida, em comparação com a apresentada no *Copernicus Climate Data Store* que é mais complexa, a grelha espacial foi reduzida para vinte e cinco quilómetros aumentando a resolução dos dados mas excluindo efeitos como ilhas de calor, tempestades,

¹ Traduzido para português pelo autor. Frase original é *spacial grid*.

² Traduzido para português pelo autor. Frase original é *data assimilation*.

microclimas, entre outros. A maior relevância desta base de dados é dada pelo facto de o *Open-meteo* focar-se em extrair os dados ERA5 da base de dados do *Copernicus*, em formato GRIB ou NetCDF e transformá-los em formatos mais amigos do usuário, tais como o *comma-separated values* (CSV), *JavaScript Object Notation* (JSON) e *Excel* (XLSX) facilitando assim o manuseamento dos dados climáticos.

2.1.1. Dados climáticos – formatos de ficheiros

Ao recolher a informação climática através de ferramentas de registos, tais como as mencionadas anteriormente, armazena-se em servidores e disponibiliza-se, à comunidade científica, os dados climáticos de forma digital através de uma base de dados online em formatos de ficheiros específicos para conter dados e metadados e serem lidos e analisados por *softwares* de análise de dados.

Network Common Data Form (NetCDF)

Um formato de ficheiro utilizado é o *Network Common Data Form* (NetCDF), foi criado para facilitar o acesso a dados científicos orientados para programação por *array*. Contém dados e metadados, pode ser acedido por computadores com diferentes formas de armazenar números inteiros, caracteres e *floats* permite aceder a dados específicos dentro de uma variedade de informação e permite que um programador possa partilhar um ficheiro com outros programadores.

General Regularly Distruted Information in Binary form (GRIB)

O formato de ficheiro GRIB foi criado para armazenar e partilhar dados formatados em grelha espacial, tendo assim um formato binário. Para analisar os dados armazenados em ficheiro GRIB é necessário converter em NetCDF, a ECMWF contém instruções online de como fazê-lo

Hierarchial Data Format (HDF)

O formato de ficheiro HDF foi criado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), à semelhança do ficheiro GRIB, para armazenar, gerir, arquivar e partilhar dados. Este formato modela o planeta Terra através de coordenadas como latitude e longitude e tempo.

2.1.2. Parâmetros climáticos

Como será referido nos capítulos seguintes, é necessário a obtenção de variáveis climáticas horárias como parâmetros a serem utilizados na criação de qualquer tipo de ficheiro climático. Estes parâmetros definem o clima exterior de uma dada região geográfica e são obtidos através de estações meteorológicas localizadas em espaços isolados da urbanização e.g. aeroportos [7]. Estes registos são armazenados em servidores de agências meteorológicas publicas como IPMA-Instituto Português do Mar e da Atmosfera, ou privadas tais como, *Open-meteo*, que disponibiliza gratuitamente variáveis climáticas via API (*Application Programming Interface*); *Meteonorm*, um *software* pago que contém a própria base de dados de registos de parâmetros climáticos e que faz a criação do ficheiro climático do tipo TMY; *CORDEX – Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*, sendo um modelo de projeção climática a nível regional.

Os parâmetros climáticos a utilizar na presente dissertação terão de ser de acordo com os parâmetros exigidos para o funcionamento do *software* de simulação higrótérmica, WUFI Plus.

Ficando por isso, cingido aos seguintes parâmetros com frequência horários: 1) velocidade do vento (m/s); 2) direção do vento (°); 3) precipitação (L/m².h); 4) radiação direta e difusa (W/m²); 5) taxa de nuvens³ (-); 6) temperatura (°C); 7) humidade relativa (%); 8) pressão atmosférica (hPa); 9) radiação Global (W/m²).

2.2. Tipos de ficheiros climáticos

Existem três tipos de ficheiros climáticos usados para simulações, tais como: 1) anos de referência ou típicos, 2) dados *Multi-year*, e 3) dias representativos [8]. A utilização do dados *Multi-year*, são soluções mais robustas para uma análise mais eficiente do desempenho energético de um edifício, pois passa pela análise térmica e/ou higrotérmica de todos os anos do *Multi-year*, e.g. 30 anos, enquanto um ano de referência é uma solução mais “leve”, pois a simulação computacional de apenas um ano referência torna-se menos exigente em termos de requisitos computacionais do que uma análise a um *Multi-year*, por simplificar num único ano todos os anos de dados horários obtidos, consumindo menos tempo na análise dos dados mas gerando menos informação. Os resultados são mais fáceis de tratar e torna mais fácil identificação e mitigação de erros por falhas de informação nos dados climáticos.

Ao decidir que tipo de ficheiro climático utilizar como *input* no *software* de análise higrotérmica é preciso ter em conta que tipo de resultados pretende obter pelas simulações efetuadas. Se o objetivo da análise for a identificação de problemas que poderão originar a degradação do material de construção da envolvente em estudo e.g humidade, ciclo gelo/degelo, crescimento de fungos, então, o ficheiro climático *Moisture Reference Year* (MRY) deve ser criado. Devendo ser utilizado como *input*, por ser um ano representativo com condições climáticas extremas. A maioria dos métodos utilizados para gerar este tipo de ficheiro climático consideram um risco de probabilidade de falha com cerca de 10%, sendo denominado na literatura como *10% level criteria*. Isto significa que as condições higrotérmicas que incrementam a ação dos agentes de degradação não podem ocorrer em mais do que 10% dos anos do *multi-year* [9][10], ou seja, uma probabilidade de ocorrência de 10%, salvo algumas exceções que são referidas na norma EN 15026-2007 [11]. Portanto, o ficheiro climático MRY deve representar 10% dos dados do *multi-year* como sendo os anos com condições climáticas, em termos de risco de agentes de degradação, mais extremos, e.g., utilizando registos de 30 anos de dados climáticos, apenas 3 dos anos serão utilizados para criar o ano representativo MRY. Se o objetivo da análise for estudos energéticos, então, o ficheiro climático *Typical Meteorological Year* (TMY) ou *Test Reference Year* (TRY) deve ser criado por se traduzirem num ano representativo de condições climáticas típicas, ou seja, ao contrário do MRY, um TMY ou TRY representa um clima não extremo, sendo assim adequado por representar as condições climáticas com a maior probabilidade de ocorrência numa dada localização.

Pode-se assim chegar à conclusão que, se pretender analisar uma envolvente de um edifício com uma certa solução construtiva, num clima representativo do ambiente exterior de uma dada localidade e procurar analisar a envolvente em condições climáticas agressivas, então o ficheiro climático que origina o ano representativo deve representar 10% desses anos i.e um *Moisture Reference Year*. Se procurar analisar consoante o clima mais provável de ocorrer nesse intervalo de tempo, então, o ficheiro climático que origina o ano representativo deve representar 90% dos anos desse intervalo de tempo, i.e *Test Reference Years* e/ou *Typical Meteorological Year*.

2.2.1. Typical Meteorological Year

Um *Typical Meteorological Year* (TMY) trata-se de um ficheiro climático, comumente utilizado pela comunidade científica para simulações energéticas [12]. Este ficheiro, é composto por um ano representativo

³ Traduzido pelo autor. Nome original, Cloud Index.

de um dado clima em análise, cujas variáveis climáticas necessárias são obtidas através de medições *in situ* e assimulações através de cálculos. O ano comprime uma série de anos com dados climáticos históricos registados horariamente, normalmente entre 10 a 30 anos de dados [13], em doze meses representativos de todos os meses do intervalo de dados climáticos escolhidos. Por exemplo, com um intervalo de dez anos, é escolhido o mês de janeiro mais representativo para incorporar o ano a ser criado como o mês de janeiro do mesmo. Este processo é efetuado através de uma comparação entre a função de distribuição acumulada⁴ para cada ano do intervalo de tempo obtido, e a função de distribuição acumulada do conjunto de todos os anos escolhidos. Em que, para medir estatisticamente a aproximação da distribuição acumulada de cada ano com a distribuição acumulada de todos os anos é utilizado o índice estatístico Finkelstein-Schafer (FS). Quanto mais aproximado forem os valores das duas distribuições acumuladas menor será o valor do índice estatístico. Após a aplicação do índice estatístico, é efetuada uma soma entre fatores de ponderação sobre os valores através de vários métodos que posteriormente servirão para decidir que meses escolher para construir o ano representativo para o ficheiro climático.

Um TMY pode ser criado recorrendo a vários métodos estatísticos que servem para criar o ficheiro climático. Os mais usados são *Sandia National Laboratory Method*, *Danish Method*, *The Festa-Ratto Method*, as variáveis que ambos os métodos necessitam para funcionar são: 1) temperatura (°C), 2) radiação solar (W/m^2), 3) velocidade do vento (m/s), 4) direção do vento (°), 5) humidade relativa (%), 6) pressão atmosférica (hPa), 7) *cloud index* (-).

Com recurso a um histórico de registos de dados climáticos horários, referentes a um intervalo de tempo e.g trinta anos, e parâmetros climáticos como, temperatura do ar, humidade relativa, velocidade do vento, e radiação global, sintetizando em doze meses representativos os meses mais típicos climaticamente do intervalo de tempo registado para a localização escolhida.

2.2.2. *Test Reference Year*

À semelhança de um TMY, o *Test Reference Year* (TRY) é um ano representativo do clima relativo a um intervalo de tempo de dados climáticos históricos horário, cujas variáveis climáticas são obtidas da mesma forma que são obtidas para a construção do TMY. Este tipo de ficheiro climático necessita, de forma igual, das variáveis de temperatura, direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, humidade relativa e *cloud index*, para criação do ficheiro climático. Tal como o TMY o processo de seleção dos meses representativos é efetuado com base nas funções de distribuição acumulada utilizando o índice de Finkelstein-Schafer para comparação das funções e utilização de fatores de ponderação para escolha dos meses representativos.

Um TRY é criado recorrendo a vários métodos estatísticos, sendo os mais usados os seguintes, *Pissimanis Method*, *Danish Method* e *Argirou Method*. Para além destes métodos, existe ainda um método indicado como norma europeia, sendo a norma EN 15927-4 [10].

2.2.3. *Design Reference Year*

Um ficheiro climático do tipo DRY, é uma melhoria do ficheiro TRY e MRY. A versão melhorada da *Chartered Institution of Building Services Engineers* (CIBSE) [13] faz a correção necessária ao TRY adicionando o parâmetro climático de radiação global no método de obtenção de um DRY.

2.2.4. *Moisture Reference Year*

⁴ Traduzido de Cumulative Distribution Function (CDF)

Como os restantes anos de referência são criados para análises térmicas, ignoram o efeito da humidade e não representam um ano de referência de condições climáticas extremas, por isso, não conseguem servir adequadamente o propósito de uma análise higrotérmica quando o foco é uma análise do ambiente interior de um edifício considerando o efeito da humidade. A humidade é um dos agentes de degradação dos materiais que constituem a envolvente do edifício, tornando-se num dado importante a considerar na análise higrotérmica.

Na realização de uma análise de uma envolvente de um edifício é importante perceber o dano causado pela humidade devido ao seu acumulação excessivo, pois estes problemas levam à degradação dos materiais de construção, ao crescimento de mofo devido a condensações intersticiais e à redução da resistência térmica na envolvente do edifício [14]. O ambiente interior é, desta forma, fortemente prejudicado pela ocorrência de humidade, que afetam o conforto no interior e pioram a qualidade do ar interior do edifício.

Para estudar, de forma mais eficaz, estes efeitos, vários autores criaram um *Moisture Reference Year* (MRY), consistindo em criar um ano de referência constituindo-se pelos meses, ou anos mais gravosos, em termos de maior risco de humidade. Os dados climáticos utilizados na construção de um MRY são baseados em registos horários de variáveis climáticas, temperatura (°C), humidade relativa (%), precipitação (mm), velocidade do vento (m/s) e direção do vento (°), radiação global (W/m²) e *cloud index* (-). Posto isto, um ano representativo construído com métodos para criar um MRY, trata-se de um ano que retrata o clima exterior mais severo que se pode obter a partir do intervalo de tempo em anos referentes aos dados climáticos históricos escolhidos.

Diferentes métodos têm sido criados ao longo dos anos. A maior parte dos métodos são desenvolvidos com base num mecanismo de dano, e.g risco de ocorrência de condensações ou crescimento de fungos [15], dividindo-se em duas categorias, [15]: 1) métodos dependentes da solução construtiva da envolvente, *construction-dependent*; 2) métodos independentes da solução construtiva da envolvente, *construction-independent*. Existem cerca de 21 métodos para a obtenção de um MRY [1]. Vandemeulebroucke et.al [1] refere que não existe um consenso em qual o método mais apropriado para a criação de um MRY. No entanto, concorda-se que um MRY, à semelhança com TRY e TMY, deve basear-se num intervalo de tempo de 10 a 30 anos, constituídos por variáveis climáticas registadas horariamente referentes a cada ano do intervalo de tempo, que deve ser representativo do clima do local em estudo e tem de permitir a análise do desempenho da envolvente de um edifício sob situações extremas de humidade.

O método *construction-dependent*, também denominado como *Response-based method*, requer que se efetue simulações higrotérmicas para classificar os anos. Ou seja, os resultados obtidos para a construção do MRY provêm de simulações HAM (*Heat, air, Moisture*) para cada ano de um dado intervalo de tempo, representando o comportamento dos materiais da envolvente para com as condições climáticas a que estão sujeitos [1]. Enquanto o método *construction-independent* utiliza os dados climáticos para classificar os anos para a construção do MRY.

Construction-dependent

Os métodos *Construction-dependent* apresentados por Vandemeulebroucke et.al [1], são os seguintes:

- 1) Moisture content
- 2) Climatic Index

Construction-independent

Os métodos *construction-independent* que existem na literatura, apresentados por Vandemeulebroucke et.al [1] e são os seguintes:

- 1) Saturation deficit
- 2) Mould Index

- 3) Wind-driven rain load (WDR)
- 4) Moisture Index (MI)
- 5) Severity Index (Isev)
- 6) Method by Nik

Pode-se concluir que ambos os tipos de métodos são importantes para uma análise detalhada de um dado caso de estudo higrotérmico. No entanto, averigua-se pela literatura que um *response-based method* poderá ser útil num caso específico, ou seja, para cada solução construtiva de uma envolvente terá de ser repetido o método, tornando o resultado mais preciso. No entanto, torna o processo de estudo moroso. Enquanto um *climate-based method* não necessita de ser repetido para cada caso e apresenta um MRY genérico para todos os casos de estudo, não sendo tão preciso como um *response-based method* mas torna o processo de estudo mais célere.

2.2.5. *Future Typical Weather Files (FTWY)*

Devido ao aumento da temperatura devida às alterações climáticas, é necessário não só projetar um edifício com recurso a temperaturas típicas, mas também futuras, de modo a perceber a performance térmica do edifício quando sujeito ao futuro aumento da temperatura, e a situações extremas como efeito das ondas de calor.

A maioria dos edifícios são projetados tendo em consideração dados climáticos históricos, usados para criar ficheiros climáticos como o TMY. Porém, estes ficheiros não permitem projetar o edifício para situações extremas futuras de calor, e com o crescente impacto das alterações climáticas a utilização de ficheiros climáticos gerados a partir de dados climáticos históricos poderá cair em desuso [16], [17]. Isto devido à necessidade, cada vez mais urgente, de prever o clima futuro e projetar os edifícios de acordo com tais previsões.

Yaqubi et al [17] criou um tipo de ficheiro climático para a cidade de Nantes em França, denominado por *Future Typical Weather File* para estudar o ambiente interior de um edifício quando sujeito a situações de calor extremas (e.g. ondas de calor). Extraíndo dados climáticos futuros com cerca de 30 anos, gerados através de um *Empirical-Statistical Downscaling (ESD)* calculado e armazenado numa base de dados da EURO-CORDEX, utilizou a norma europeia EN ISO 15927-4 como método para criar um ano climático típico (TRY) futuro, que posteriormente conjugou com um método de previsão do efeito de ilhas de calor, criado pelo *Urban Weather Generator (UWG)*.

Machard et al [16] criou um método para construção de um FTWY argumentando ser necessário pois não há métodos suficientes a serem desenvolvidos pelos investigadores. Dividindo em um tipo de ficheiro climático futuro⁵, *Typical Weather Years (TWY)* e um método de análise denominado por *Heatwave Events (HWE)*, que conjugados tornam a análise do desempenho térmico do edifício mais precisa. Nesta metodologia, o autor recorreu ao EURO-CORDEX para recolher dados climáticos previstos para o futuro, extraíndo-os com recurso ao *software* Python para a cidade de Paris, e escolheu os parâmetros climáticos relevantes para a construção de um ficheiro climático, sendo a temperatura, humidade relativa e humidade absoluta, radiação solar, nebulosidade⁶ e pressão atmosférica referentes a um intervalo de 30 anos sendo de 2041 a 2070.

Os dados climáticos recolhidos são obtidos através de previsões estatísticas, pelo que não foi possível obter os parâmetros climáticos num registo horário, tendo sido obtido apenas mensalmente. Por isso, foi necessário recorrer a interpolação para transformar os registos mensais em registos horários, e com isso ficar apto a ser utilizado na formação de um ficheiro climático. Após a recolha e tratamento dos dados, a criação do ficheiro climático TWY foi executada com recurso à norma EN ISO 15927-4. A criação do HWE foi executada

⁵ Traduzido pelo autor. A palavra original seria *Future Typical Weather Files*

⁶ Traduzido pelo autor. Palavra original é *cloud cover*.

segundo um método desenvolvido em França, que foi adaptado ao EURO-CODEX [18], pois originalmente esse método serviria para detetar períodos de frio no país, definindo limites de percentis da temperatura média numa distribuição de vários anos, permitindo caracterizar as ondas de calor consoante a temperatura máxima, duração de onda de calor e intensidade. Ao aplicar este método ao ficheiro climático criado é possível prever os meses e o ano de ocorrência de ondas de calor num ficheiro climático que representa uma previsão de um ano típico meteorológico.

2.3. Métodos para criação de ficheiros climáticos

2.3.1. Criação de um ficheiro *Typical Meteorological Years (TMY)*

Como supramencionado, três métodos podem ser utilizados, o Sandia National Laboratory Method, Danish Method e The Festa-Ratto Method.

2.3.1.1. Sandia National Laboratory Method

Este método foi proposto por Hall et al. [15] e tendo sido modificado por vários investigadores ao longo do tempo. Janjai et al. [19] realizaram uma alteração usando alguns aspetos de *Pissimanis Method* para criar um TMY recorrendo a dados climáticos recolhidos em quatro estações situadas em quatro cidades do Vietname. Os parâmetros climáticos utilizados são: 1) temperatura máxima do ar ($T_{\max}$), 2) temperatura mínima do ar ($T_{\min}$), 3) temperatura média (T_{mean}), 4) humidade relativa máxima, 5) velocidade máxima do vento, 6) velocidade média do vento, 7) radiação global. Estes parâmetros climáticos foram utilizados para criar um *Typical Meteorological Month (TMM)*, posteriormente estes TMM's serão utilizados para dar origem ao TMY. O método é criado da seguinte forma [19]:

- Passo 1: Para cada parâmetro x_i , foi criada uma *Cumulative Distribution Function* (CDF_m) de x_i para cada mês, cobrindo um período de 10 anos. Uma $CDF_{y,m}$, a curto prazo, de x_i para cada ano y e mês m , é criada.
- Passo 2: Usou-se o *Finkelstein-Schafer (FS) statistic* para o CDF_m e $CDF_{y,m}$ com a seguinte equação:

$$FS_{xi}(y, m) = \frac{1}{Nd} \sum_{j=1}^{Nd} |CDF_m(x_{i,j}) - CDF_{y,m}(x_{i,j})| \quad 2.1$$

Em que, $FS_{xi}(y, m)$ é a estatística do parâmetro x_i , ano y e mês m , j é o intervalo numérico dos dados, e N_d é o número total de intervalos.

- Passo 3:

$$WS(y, m) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} WF_{xi} \times FS_{xi}(y, m) \quad 2.2$$

Onde: $\sum_{i=1}^{N_p} WF_{xi} = 1$, WF_{xi} é o Weighting fator para o FS de variável x_i e N_p é o número total de parâmetros. Para este caso, o Weighting Fator para $T_{\max}$, $T_{\min}$, $RH_{\max}$, $RH_{\min}$ é 0,04, para T_{mean} , RH_{mean} , $W_{\max}$, W_{mean} , é 0,08, para a radiação global é 0,5.

Todos os meses são ordenados ascendentemente consoante os valores de WS.

➤ Passo 4:

Os três meses com o valor mais baixo de WS são selecionados como meses candidatos. Para cada mês candidato, a raiz quadrada da diferença (RMSD) entre a radiação em cada hora de cada mês e a média de radiação horária a longo prazo (d_i).

$$RMSD = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad 2.3$$

Onde n é o número de pares de dados. O mês candidato com menor RMSD é o escolhido para ser o TMM. O TMY é composto por 12 TMM's.

2.3.1.2. Danish method

Utiliza-se sete parâmetros climáticos para construir o TMY, cujos parâmetros climáticos são: 1) temperatura média do ar, 2) temperatura máxima do ar, 3) humidade relativa média, 4) velocidade média do vento, 5) pressão atmosférica média, 6) duração da irradiação solar, 7) radiação solar global.

O TMY é construído da seguinte forma:

➤ *Passo 1:*

Utilizar os parâmetros, Temperatura média, Temperatura máxima e radiação global.

Estes parâmetros são chamados de x_i (y , m , d).

Para retirar as variações sazonais, o valor de x_i (y , m , d) são subtraídos pela média diária a longo prazo de x_i (y , m , d) pela seguinte fórmula:

$$Y_i(y, m, d) = x_i(y, m, d) - \bar{x}_i(m, d) \quad 2.4$$

Y_i (y , m , d) significa o parâmetro residual de x_i (y , m , d), $\bar{x}_i(m, d)$ sendo a média a longo prazo de x_i (y , m , d).

➤ *Passo 2*

Usando o Y_i obtém-se a média residual mensal, $\bar{Y}_i(y, m)$, com um desvio correspondente $\sigma_{Y_i}(y, m)$. De seguida a média residual é convertida numa média padronizada $f_{Y_i}(y, m)$, através da seguinte equação:

$$f_{Y_i}(y, m) = \left| \frac{\bar{Y}_i(y, m) - \bar{Y}'_i(y)}{\sigma_{Y_i}(y)} \right| \quad 2.5$$

$\bar{Y}'_i(y)$ significa a média anual de $\bar{Y}_i(y, m)$ com a associação do desvio $\sigma'_{Y_i}(y)$.

➤ *Passo 3*

O desvio padrão $\sigma'_{Y_i}(y)$ é transformado em média, associando um desvio padrão de média mensal $\sigma'_{\sigma_{Y_i}}(y)$. Por sua vez é convertido num desvio padrão estandardizado, $f_{\sigma_i}(y, m)$ pela seguinte equação:

$$f_{\sigma i}(y, m) = \left| \frac{\sigma_{Yi}(y, m) - \overline{\sigma'_{Yi}}(y)}{\sigma_{\overline{\sigma'_{Yi}}}(y)} \right| \quad 2.6$$

➤ *Passo 4*

Os valores de $f_{Yi}(y, m)$ e $f_{\sigma i}(y, m)$ são comparados para selecionar um valor máximo, $f_{\max}(y, m)$ segundo a seguinte condição:

$$f_{\max}(m, y) = \text{MAX} \{f_{Yi}(y, m), f_{\sigma i}(y, m)\}, \quad i = 1, 2, 3 \quad 2.7$$

Os meses candidatos são ordenados de forma ascendente de $f_{\max}(m, y)$ e os primeiros três valores, a começar pelo valor mais elevado, são selecionados como prioridades a candidatos.

➤ *Passo 5*

As médias, a curto e longo prazo, dos sete parâmetros diários são calculados. Para cada parâmetro do mês m e ano y , se os valores da média a curto prazo diferirem dos valores da média a longo prazo por mais de que um valor do desvio padrão, dá-se o a classificação de 0 a cada mês correspondente, de outra forma, o mês é classificado com 1. A classificação final para cada mês é a soma das classificações obtidas nos sete parâmetros para o mesmo mês, até um máximo de classificação de 7.

O mês com a maior classificação é selecionado para preencher o mês correspondente no TMY.

2.3.1.3. **Festa-Ratto method**

Utiliza-se cinco parâmetros climáticos diários para criar o TMY, sendo, Temperatura máxima do ar, Temperatura média, humidade relativa média, velocidade média do vento e radiação solar global. O TMY é construído pela seguinte forma:

➤ *Passo 1*

$X_i(y, m, d)$, $i = (1, 2, \dots, 5)$, onde y significa anos, m significa mês e d significa dia.

Os parâmetros x_i são convertidos num valor residual padrão $X_i(y, m, d)$ para uma média de termos de longo prazo segundo a seguinte expressão:

$$X_i(y, m, d) = \frac{x_i(y, m, d) - \overline{x_i(m, d)}}{\sigma_{\overline{x_i}}(m, d)} \quad 2.8$$

$\overline{x_i}(m, d)$ é a média mensal a longo prazo com o correspondente desvio padrão $\sigma_{\overline{x_i}}(m, d)$.

➤ *Passo 2*

$Z_i(y, m, d)$ é o valor residual padronizado, calculado pela seguinte formula:

$$Z_i(y, m, d) = X_i(y, m, d) \times X_i(y, m, d+1) \quad 2.9$$

➤ *Passo 3*

De forma semelhante ao cálculo de $x_i(y, m, d)$, $z_i(y, m, d)$ é convertido num valor residual padrão $Z_i(y, m, d)$ pela seguinte fórmula:

$$Z_i(y, m, d) = \frac{z_i(y, m, d) - \overline{z_i(m, d)}}{\sigma_{\overline{z_i(m, d)}}} \quad 2.10$$

➤ *Passo 4*

Para cada mês, o valor diário residual de $X_i(y, m, d)$ foi retirado para obter o valor médio residual mensal a curto prazo $\overline{X_i}(y, m)$ com o correspondente desvio padrão. Em seguida é retirado o valor residual mensal para obter a média a longo prazo do valor residual mensal $\overline{X'}(m)$ com o respetivo desvio padrão. O mesmo procedimento é efetuado para $Z_i(y, m, d)$. É calculado a função de curto prazo *cumulative distribution function* (CDF_m) para $\overline{X_i}(y, m)$ e $Z_i(y, m, d)$.

➤ *Passo 5*

A distância estatística entre os termos a curto prazo e longo prazo para os valores médios (d_{av}) e o desvio padrão (d_{sd}) e o parâmetro de Kolmogorov-Smirnov (d_{ks}) são calculados para ambos os parâmetros correspondentes a X_i e Z_i da seguinte forma:

- $d_{av, X_i}(y, m) = |\overline{X_i}(y, m) - \overline{X'}(m)|$
- $d_{av, Z_i}(y, m) = |\overline{Z_i}(y, m) - \overline{Z'}(m)|$
- $d_{sd, X_i}(y, m) = |\sigma_{\overline{X_i}}(y, m) - \sigma_{\overline{X'}}(m)|$
- $d_{sd, Z_i}(y, m) = |\sigma_{\overline{Z_i}}(y, m) - \sigma_{\overline{Z'}}(m)|$
- $d_{ks, X_i}(y, m) = \max |CFD_{y, m}(\overline{X_i}) - CFD_m(\overline{X_i})|$
- $d_{ks, Z_i}(y, m) = \max |CFD_{y, m}(\overline{Z_i}) - CFD_m(\overline{Z_i})|$

De seguida as distancias $d_{xi}(y, d)$ e $d_{zi}(y, d)$ são calculadas como:

- $d_{xi}(y, m) = (1 - a - b) \times d_{ks, xi}(y, m) + a \times d_{av, xi}(y, m) + b \times d_{sd, zi}(y, m)$

$$a = b \sim 0,1$$

➤ *Passo 6*

Para cada mês, os valores das distâncias calculadas são comparados e o máximo das distâncias é eleito para representar a distância para o mês correspondente. O TMM é o mínimo valor da distância daqueles meses, a longo prazo, é o valor escolhido para representar o TMM.

Bilbao et al. [6] escolheu para a criação de um TRY os três métodos supramencionados.

2.3.2. Criação de um ficheiro *Test Reference Year (TRY)*

2.3.2.1. Pissimanis method

Este método requer os seguintes parâmetros climáticos: 1) temperatura diária média, 2) temperatura máxima diária, 3) temperatura mínima diária, 4) humidade relativa diária, média, mínima e máxima, 5) velocidade do vento média, mínima, máxima, 6) radiação solar global diária. Este método é traduzido em dois passos, nomeadamente:

➤ *Passo 1*

Para cada mês são escolhidos cinco meses candidatos com recurso a CDFs para os parâmetros diários que estão mais próximos dos valores de CDF a longo prazo.

Com recurso ao *Finkelstein-Schafer statistic (FS)*, o mês candidato de CDF é comparado com o CDF a longo prazo para cada variável x , ano y , mês m .

➤ *Passo 2*

A seleção final dos cinco meses candidatos é efetuada através da raiz quadrada média das diferenças entre os valores da radiação global diária obtidos para cada um dos meses candidatos. O valor mais baixo da raiz quadrada média é escolhido como mês de referência.

2.3.2.2. Danish method 2

O Danish Method II por ser um método apresentado por Lund e referido por Bilbao et al. [2], e por apresentar diferenças do original, Danish Method. Por basear-se em cinco parâmetros climáticos, sendo, temperatura média diária, temperatura máxima diária, humidade relativa, velocidade do vento, e irradiação solar.

O procedimento para gerar o ficheiro climático está definido no Danish Method.

2.3.2.3. Argiriou method

Baseado no método de Festa-Ratto [2]. Baseia-se nos seguintes parâmetros climáticos, nomeadamente: 1) temperatura diária máxima e média; 2) humidade relativa diária; 3) velocidade do vento; 4) radiação global. O processo de seleção dos meses que compõem o ano representativo está definido no método de Festa-Ratto.

2.3.2.4. Norma EN ISO 15927-4

A norma EN 15927-4 [10] é utilizada para a obtenção de um *Test Reference Year (TRY)*. Os cálculos são realizados para os seguintes parâmetros climáticos: 1) temperatura (°C); 2) humidade relativa (%); 3) radiação global; 4) velocidade do vento. Selecionando como parâmetros principais, temperatura, humidade relativa e radiação global e, como parâmetro secundário, a velocidade do vento.

Barreira et al [20] utilizou esta metodologia para construir um TRY para a cidade do Porto, em Portugal. Realizando o cálculo da *cumulative distribution function (CDF)* para cada mês de cada ano individual do intervalo de tempo obtido. Em seguida, selecionando três anos com menor valor de *Finkelstein-Schafer statistic (FS)* para os parâmetros principais, estes anos são denominados como anos candidatos. Após calcular o FS para cada mês dos três anos selecionados, calculou-se o desvio absoluto da média da velocidade do vento e

selecionou-se o mês com menor desvio absoluto como mês representativo do TRY. O mesmo procedimento foi feito para todos os meses do ano, obtendo-se assim um TRY.

É de referir que na literatura são apresentadas várias metodologias para gerar um TRY. No entanto, o mesmo método pode diferir consoante as alterações que os autores forem efetuando ao método original. Contudo, as alterações referem-se aos parâmetros climáticos, por necessidades de ajustar o método com os parâmetros disponíveis nos registos de uma dada localização no caso de estudo.

A norma EN 15927-4 [10] é utilizada como método para construir anos representativos de dados climáticos. Baseia-se em registos anuais de dados climáticos e pode contemplar os seguintes parâmetros, tais como:

- 1) Temperatura
- 2) Irradiação solar normal direta no plano horizontal
- 3) Irradiação solar difusa no plano horizontal
- 4) Humidade Relativa
- 5) Humidade Absoluta
- 6) Pressão do vapor de água ou temperatura de ponto de orvalho
- 7) Velocidade do vento a uma altura de 10 metros acima do solo

Porém, podem ser aplicados outros parâmetros para situações mais específicas, como por exemplo situações de análise higrotérmica.

A norma estabelece os seguintes passos para a construção de um ano representativo.

➤ *Passo 1:*

Selecionar os melhores meses representativos dos registos anuais de dados climáticos, com no mínimo 10 anos de registos, de forma a obter um ano representativo i.e janeiro, fevereiro, março, abril, maio, junho, julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro.

A temperatura, humidade relativa e radiação global são nomeados parâmetros principais (p), sendo a velocidade do vento nomeada parâmetro secundário. Para cada parâmetro p são executadas as seguintes operações:

Calcular a média diária para cada parâmetro principal

Para cada mês, determinar o CDF das médias diárias de todos os anos dos registos climáticos e ordenar os valores por ordem crescente. Usar a seguinte equação:

$$\Phi(p, m, i) = \frac{K(i)}{N + 1} \quad 2.11$$

Onde $\Phi(p, m, i)$ é o CDF (*cumulative distribution function*), $K(i)$ é o lugar da ordem crescente onde se situa o valor i da média diária para o respetivo parâmetro primário daquele mês no todo dos registos, e N é o número de dias de cada mês no todo dos registos climáticos, e.g para 10 anos de registos, janeiro tem um total de 310 dias.

Para cada ano dos registos, calcular o CDF das médias diárias de cada mês do calendário e ordenar os valores de cada mês associado ao ano por ordem crescente segundo a equação:

$$F(p, y, m, i) = \frac{J(i)}{n+1} \quad 2.12$$

Onde $F(p, y, m, i)$ é o CDF das médias diárias para cada mês do calendário para cada ano, $J(i)$ é o lugar na ordem crescente onde se situa o valor i da média diária para o respetivo parâmetro primário e n , o número de dias para cada mês.

Determinar o *Finkelstein-Schafer statistic (FS)* para cada mês de cada ano segundo a equação:

$$FS(p, y, m) = \sum_{i=1}^n |F(p, y, m, i) - \phi(p, m, i)| \quad 2.13$$

Onde $F(p, y, m, i)$ é o CDF das médias diárias para cada mês do calendário para cada ano, $\phi(p, m, i)$ é o CDF.

Ordenar cada mês dos registos climáticos por ordem crescente segundo o FS. Este procedimento é efetuado para cada um dos doze meses de um ano.

Somar os três *rankings* para cada mês do calendário. Para os três meses mais baixos de todos os meses do *ranking*, calcular o desvio absoluto entre a média mensal da velocidade do vento e a média mensal de todo o registo climático. Por fim, selecionar o mês com menor desvio absoluto como mês representativo.

➤ Passo 2

De forma a tornar a transição entre os meses selecionados mais suave, submete-se as últimas oito horas do mês antecedente e as primeiras oito horas do mês procedente a uma interpolação.

2.3.3. Criação de um ficheiro *Moisture Reference Year (MRY)*

Vandemeulebroucke et.al [1] concebeu um modelo de decisão de que métodos utilizar para um estudo higratérmico, construindo cinco níveis de decisão, nos quais a complexidade e exigência computacional do processo de construção de um MRY é mitigada à medida que se vai chegando ao quinto nível de decisão, com a consequência de os métodos usados no quinto nível serem menos complexos e conterem um erro de precisão maior que um método usado no primeiro nível, no entanto, continuam de acordo com as exigências da norma EN 15026. Na presente dissertação irá ser descrito apenas o quarto e quinto nível, por se adequar ao estudo em causa e aos recursos disponíveis, no entanto nomeia-se os níveis de decisão da seguinte forma:

- 1) Nível 1: Full response -based simulation MRY
- 2) Nível 2: Reduced base-response simulation MRY
- 3) Nível 3 Limited response-based simulation MRY
- 4) Nível 4: Specific climate-based simulation MRY
- 5) Nível 5: Generic climate-based simulation MRY

Uma simulação *Generic climate-based* entende-se por uma simulação com um método do tipo *climate-based*. Dado que, um software de simulação HAM e.g WUFI utiliza um ficheiro climático de apenas uma localidade para cada simulação higrotérmica. Por isso, o nível cinco baseia-se apenas na criação de um MRY com base em parâmetros climáticos.

De forma resumida, o nível 1 constitui a análise higrotérmica de todo um *multi-year* com trinta anos de registos climáticos horários, constituindo uma análise muito precisa, mas extremamente morosa e exigente em requisitos computacionais. No nível 2, a análise higrotérmica é feita individualmente para cada ano do *multi-year*, utilizando-se a norma EN 15026-2007 para obter o MRY. No nível 3 selecciona-se os anos através de métodos *climate-based* e realiza-se análises higrotérmicas para esses anos, de seguida, o ano mais crítico entre os anos seleccionados é escolhido como MRY.

2.3.3.1. Nível 4: Specific climate-based simulation

Quando é necessário situar o caso de estudo em várias localidades geográficas, torna-se complexo realizar um *response-based simulation*. Por isso, este nível de decisão contempla apenas métodos *climate-based* mas incluindo mecanismos de degradação e.g., gelo-degelo. Considera-se os parâmetros climáticos que correspondem a um dado mecanismo de degradação e, de seguida, escolhe-se um método *climate-based* adequado para estudar o mecanismo de degradação. Por fim, o MRY será o ano mais gravoso de acordo com o método usado e o mecanismo em análise, para vários mecanismos poderá ser necessário vários métodos correspondentes e por consequência poderá resultar em anos de referência diferentes.

2.3.3.2. Nível 5: Generic climate-based simulation

No nível de decisão 5, tal como o nível 4, contempla métodos *climate-based* porém, utiliza parâmetros climáticos e métodos que não respondem de forma específica ao efeito de um mecanismos de degradação. Criando-se assim um MRY genérico, enquanto no nível 4 pode obter vários MRY consoante os mecanismos de degradação que se pretendem analisar, e.g degradação da madeira, gelo-degelo, corrosão, entre outros.

2.3.3.3. Métodos response-based

Moisture content (MC)

Este método, introduzido por Rode [21], baseia-se nas quantidades de humidade inserida na envolvente dos edifícios para criação de um MRY, construindo a partir de simulações higrotérmicas.

- 1) Cada ano do *multi-year* é individualmente simulado higrotérmicamente, através de *software*, para cada orientação e solução construtiva da fachada.
- 2) Classifica-se os anos de acordo com a maior severidade de humidade, baseando-se no valor de *moisture content (MC)*. Quanto maior o MC, maior nível de humidade na solução construtiva.
- 3) Para as diferentes fachadas estudadas escolhe-se como MRY o ano mais próximo do nonagésimo percentil (P90)

Kim et.al. [22] apresentam um método mais detalhado para a obtenção de um MRY, utilizando um modelo de simulação 1-D em *software*, consoante os seguintes passos:

- 1) Através de simulações higrotérmicas com recurso a um *software*, para cada solução construtiva obtém-se o máximo *moisture content (MC)* e a média de MC.
- 2) Com recurso a uma função de distribuição normal obtém-se o nonagésimo percentil (P90) para o máximo e para a média de MC obtida previamente. Com isto, cada solução construtiva terá dois valores associados e será gerado 12 MRY's para cada localidade em estudo.

- 3) Classificar todos os anos do *multi-year* consoante a média de MC, determinada nos passos anteriores, pelo *software* de simulação higrotérmica. O ano com maior média é classificado como o primeiro lugar, sendo os restantes lugares por ordem decrescente do valor da média. Para um *multi-year* de trinta anos o nonagésimo percentil i.e *10% level* será o terceiro ano da classificação.
- 4) Para todas as soluções construtivas analisadas, selecionar cinco anos que tenham em comum, serem os piores anos para várias soluções construtivas. Para cada ano obtido, calcular o somatório das classificações e obter a média das mesmas.
- 5) Selecionar os três anos com a média mais baixa.
- 6) Calcular o nível de probabilidade média utilizando a média de MC para cada ano selecionado através da função de distribuição normal.
- 7) Repetir os passos 3, 4 e 5 para o valor máximo de MC
- 8) O ano com menor nível de probabilidade é selecionado como MRY para uma localização em específico.

Climatic Index (CI)

Este método pode ser considerado como um balanço entre humedecimento e secagem, ou seja, componentes que contribuem para um estado saturado do material e componentes que contribuem para um estado seco do material. Como a humidade inserida numa envolvente de um edifício resulta da capacidade dos materiais envolvidos na solução construtiva dessa envolvente, de absorver ou adsorver mais água ou menos água, independentemente do estado físico, e de deixar sair essa mesma água para atingir um estado seco, por isso, um ano de referência utilizado para análise higrotérmicas, deve representar o clima mais gravoso considerando os parâmetros climáticos mais determinantes para a análise.

O MRY deve ser selecionado considerando tanto humedecimento como secagem. A chuva incidente⁷ (WDR), ou seja, a chuva que é projetada pelo vento, é considerado a maior fonte de humidade nas envolventes dos edifícios, a orientação da envolvente também contribui para o maior, ou menor impacto da WDR, pelo que se torna num parâmetro importante. O WDR é então considerado um humedecimento por ser um parâmetro que contribui para um estado saturado da envolvente. Como a secagem, considera-se a evaporação da água dos poros do material da envolvente do edifício, este parâmetro é representado através dos registos nomeados como potencial anual de evaporação⁸.

Apresentado por Zhou et. al [23], faseando o processo nos seguintes passos:

- 1) Para avaliar a humidade numa envolvente faz-se a comparação entre humedecimento e secagem através da forma:

$$\text{Climatic Index} = \frac{\text{Annual WDR Load}}{\text{Annual potential evaporation}} \quad 2.14$$

Onde o anual WDR Load (kg/m²a), pode ser obtido de duas formas. Vandemeulebroucke et al.[20] usou a norma ISO EN 15297-2005, ou como Zhou et al [23] através do ASHRAE Standard 160, sendo ambos a soma dos registos horários de WDR Load. O WDR é calculado pela seguinte expressão:

$$R_{WDR} = R_h \times F_E \times V_{10} \times F_D \times 0.2 \times \cos\theta \quad 2.15$$

Em que R_h significa a quantidade de precipitação horizontal (Kg.m⁻².h⁻¹), F_E é o fator de exposição à chuva [-], depende do terreno circundante e da altura do edifício. F_D é o fator de disposição à chuva, V_{10} é a

⁷ Em inglês, *Wind driven rain* (WDR).

⁸ Em inglês, *annual potential evaporation*.

velocidade do vento a 10 metros acima da superfície (m/s); θ é o ângulo entre a direção do vento e a normal à envolvente (Rad).

O potencial anual de evaporação é calculado da seguinte forma [24]:

$$K + L - IE - V - A = 0 \quad 2.16$$

Onde, K é a radiação de onda curta (W/m^2), L é a radiação de onda longa (W/m^2), IE é o fluxo convectivo latente à evaporação (W/m^2), V é o fluxo de calor convectivo para a atmosfera (W/m^2), A é o fluxo de calor por condução do material poroso (W/m^2).

- 2) Na fase 2, para o *multi-year* de 30 anos (mínimo), são escolhidos o terceiro, quarto e quinto anos de referência. Estes anos são escolhidos através do menor resultado do CI, e.g CI = 0,2 é um ano de referência pior que um ano com CI = 0,05, ao que o primeiro lugar seria o CI = 0,05.
- 3) De seguida, são efetuadas simulações higrotérmicas e cálculos de risco de crescimento de fungos, RHT *index*, para os respetivos anos selecionados.
- 4) O ano com maior RHT *index* entre os três anos simulados é selecionado como MRY.

RHT *index*, significa uma taxa de crescimento de fungos, é obtida através de uma média de temperatura e humidade relativa para dez dias. É calculado com a seguinte expressão:

$$RHT = \sum (RH - RH_x) \times (T - T_x), \quad \text{onde } RH > RH_x \text{ e } T > T_x \quad 2.17$$

RH significa humidade relativa (%), T significa temperatura ($^{\circ}C$), RH_x e T_x são valores fronteira.

2.3.3.4. Métodos *climate-based*

Saturation deficit (SD)

A condensação do vapor de água no interior dos materiais, que compõem a envolvente, constitui problemas para o desempenho higrotérmico do edifício por provocar deformações, degradação e alterações das propriedades dos materiais e contribuir para o aumento das necessidades energéticas do edifício. Por isso, este método apresentado por Kalamees e Vinha [9], é um MRY criado para a análise de condensações de vapor de água através do *saturation deficit* (SD) como medida do potencial do ar exterior para secagem⁹. É um método específico para analisar o efeito de um mecanismo de degradação, sendo por isso, englobado no nível de decisão 4: *climate-based simulation* específica, considera como parâmetros climáticos, temperatura e humidade relativa e absoluta.

Baseado na norma alemã DIN-4108-3, estabelece a média da diferença entre o limite de saturação e a humidade absoluta do ar. SD pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\Delta v_{sat.def} = \overline{v_{sat}(T_{out})} - v_{out} \quad 2.18$$

⁹ Traduzido pelo autor. Na versão original escreve-se como *Drying Potential*.

Onde $\Delta v_{sat.def}$ (g/m³) é média da diferença entre o limite de saturação e a concentração de vapor de água. V_{sat} (g/m³) é o limite de saturação do ar¹⁰, T_{out} (°C), e concentração do vapor de água¹¹, v_{out} (g/m³).

$$v_{sat} = \frac{a \times (b + \frac{T_{out}}{100})^n}{461,4 \times (T_{out} + 273,15)} \times 1000 \quad 2.19$$

$$v_{out} = v_{sat}(T_{out}) \times RH_{out} \quad 2.20$$

- Se $0 \leq T_{out} \leq 30^\circ\text{C}$, $a = 288,68$ Pa, $b = 1,098$, $n = 8,02$
- Se $-20 \leq T_{out} \leq 0$, $a = 4,689$ Pa, $b = 1,486$, $n = 12,3$

A obtenção do MRY pode ocorrer apenas analisando dados *multi-year* para os meses da estação de inverno por serem os meses que correspondem a um período onde a probabilidade de ocorrência de condensações é elevada, considerando assim, um MRY mais preciso na análise de condensações de vapor de água. O SD descreve o potencial do ar exterior para a secagem do material, significando assim que, quanto menor o resultado menor o potencial. Posto isto, a menor média de SD dos três meses de inverno representa o ano mais severo, sendo o ano de referência.

Mould Index

Ambientes com humidades relativas acima de 80% tornam-se propícios ao crescimento de fungos, para a maior parte dos materiais de construção esse cenário está bastante presente, pois os materiais oferecem as condições necessárias para o desenvolvimento de vida. Por isso, é importante ter em conta nos estudos higro-térmicos este fator. O crescimento de fungos está dependente de imensos fatores, tais como os parâmetros climáticos, temperatura, humidade relativa, a humidade absoluta intrínseca num dado material de construção, as variações climáticas de um dado ambiente ao longo do tempo, o tipo de material, a superfície do material e a quantidade de matéria orgânica que ocupa os poros ou a superfície do material.

O risco para a ocorrência de criação de fungos está entre humidade relativa superior a 80% e a temperatura entre os 5 e 50°C, para materiais compostos por madeira.

Este método foi apresentado por Kalamee e Vinha [9], baseando-se em modelos de cálculo desenvolvidos por Viitanen et al [25]. O método é faseado nos seguintes passos e aplica-se a elementos de madeira:

- 1) Através da equação polinomial seguinte, estabelece-se as condições de fronteira para o estado crítico de humidade relativa para a criação de fungos em relação à temperatura, para materiais compostos por madeira.

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0,00267T^3 + 0,160T^2 - 3,13T + 1000, & T \leq 20^\circ\text{C} \\ 80\%, & T > 20^\circ\text{C} \end{cases}$$

Onde RH_{crit} , significa humidade relativa critica.

- 2) Calcula-se o *Mould Index* através da seguinte expressão:

¹⁰ Traduzido pelo autor. No original refere-se como *saturation absolute humidity*

¹¹ Traduzido pelo autor. No original refere-se como *ambient air absolute humidity*

$$M_{max} = 1 + 7 \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} - 2 \left(\frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right)^2 \quad 2.21$$

Onde M_{max} significa o máximo *Mould Index* obtido segundo a relação humidade relativa critica e temperatura.

- 3) Calcula-se o tempo necessário para a iniciação do crescimento de fungos, $M < 1$, através da seguinte expressão

$$t_m = \exp(-0,68 \ln(T) - 13,9 \ln(RH) + 0,14W - 0,33SQ + 66,02) \quad 2.22$$

Onde t_m significa o tempo em semanas.

Se pretender obter em função do tempo diário utiliza-se a seguinte expressão.

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \times \exp(-0,68 \ln(T) - 13,9 \ln(RH) + 0,14W - 0,33SQ + 66,02)} \cdot k_1 \cdot k_2 \quad 2.23$$

Onde $\frac{dM}{dt}$, significa o incremento do *mould index* ao dia.

- 4) Após a fase inicial, $M < 1$, o crescimento de fungos continua a aumentar, $M = 1$, pelo que terá de ser usada uma nova equação para representar esta fase.

Onde k_1 representa o incremento do *mould index* desde $M = 1$ até o máximo $M = 3$, e k_2 , um fator de correção, assumindo um défice no *mould index* de 10%.

$$k_1 = \begin{cases} 1, & \text{se } M < 1 \\ \frac{2}{\frac{t_v}{t_m} - 1} & \text{se } M > 1 \end{cases}$$

$$k_2 = 1 - \exp[2,3(M - M_{max})]$$

Para seleccionar o MRY, o cálculo do *mould Index*, M , é efetuado para cada ano do *multi-year*, começando em julho ao invés de janeiro, seleccionando o ano com maior *mould index*. Os parâmetros climáticos diários utilizados são, a temperatura média e a humidade relativa. Como se pode observar, este método enquadra-se no nível de decisão 4, por ser orientado para responder a apenas um mecanismo de degradação.

Moisture Index (MI)

Este método foi apresentado por Cornick et al [3], argumentando que um *Moisture index*, traduzido para taxa de humidade, atribui uma caracterização do clima mais exata. Este método responde ao problema da humidade ao criar um MRY baseando-se num *wetting Index(WI)* e num *Dryng Index(DI)*, sendo WI uma função que quantifica o estado humedecido da envolvente segundo parâmetros como, precipitação anual média, *Driving-rain Index*, *directional Driving-Raind index*. Cornick et al. [3] usou a precipitação média anual

como valores para WI, enquanto o DI é uma função que se baseia na diferença entre o rácio de limite de saturação, w_{sat} , e a concentração de vapor de água no ar [3]. Sendo o DI calculado segundo a expressão:

$$DI = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^k \Delta w \quad \left[\frac{kg \text{ água}}{kg \text{ ar} - ano}\right] \quad 2.24$$

Onde Δw é a diferença entre o rácio do limite de saturação e a humidade à condição ambiente (g/m^3), n é o número de anos, e k o número de horas num ano, podendo ser 8760 ou 8784 horas, para ano normal e bissexto respetivamente.

Sendo Δw , calculado da seguinte forma:

$$\Delta w(T) = w_{sat}(T) - w_{out}(T) \quad [kg \text{ água} / kg \text{ ar}] \quad 2.25$$

Onde w_{sat} , é o rácio do limite de saturação e w_{out} , é a concentração de vapor de água no ar.

A criação de um MRY segundo Cornick et al. [3] é feita da seguinte forma, tendo em conta que quanto maior o valor de MI, maior a probabilidade de ocorrência de humidade.

- 1) Calcular o *normalization scheme* com a seguinte expressão:

$$I_{normalized} = \frac{(I - I_{min})}{(I_{mas} - I_{min})} \quad 2.26$$

Onde I , significa Index of interest.

- 2) Cálculo do MI:

$$MI = \sqrt{WI_{normalized}^2 + (1 - DI_{normalized})^2} \quad 2.27$$

Este método permite uma certa flexibilidade na escolha do MRY consoante a necessidade do usuário. Pode escolher três MRY's para três fatores distintos, se pretender fazer uma análise higrotérmica para um edifício situado numa cidade com um certo clima. Se quiser focar a análise nas capacidades de evaporação poderá escolher-se um MRY consoante o *Dry year*, ou seja, um ano com o MI mais baixo, logo um DI maior. Se pretender um ano mais gravoso com maior probabilidade de criação de humidade, posso escolher como MRY um *Wet year*, ou seja, o ano com o MI mais alto, logo com um WI maior. Se pretender escolher um MRY equilibrado entre o DI e o WI denominado como *average year*, sendo o ano escolhido em que o MI está situado no desvio padrão da média do MI para o dado *multi-year* estudado

Severity index (I_{sev})

O método *Severity Index* foi desenvolvido pela ASHRAE como um meio de previsão do *RHT index*, sendo RHT um indicador de risco de existência de mecanismos de degradação. O I_{sev} é apenas válido para

fachadas orientadas a Norte, é um modelo de regressão para o cálculo de danos nas envolturas do edifício com base em parâmetros climáticos, escolhendo-se os anos com maior I_{sev} como anos mais severos [15].

O RHT pode ser obtido da seguinte forma:

$$RHT = \sum (RH - RH_x) \cdot (T - T_x) \text{ para } RH > RH_x \text{ e } T > T_x \quad 2.28$$

Sendo RH, a humidade relativa [%] e T a temperatura [°C], e os valores limite RH_x , humidade relativa entre 80 e 70 % para o risco de mecanismos de degradação i.e., crescimento de fungos, e T_x , Temperatura a 0 a 5°C [15][26].

O *severity index* (I_{sev}) é obtido da seguinte forma:

$$I_{sev} = 108307 - 241 \cdot Rad - 1391 \cdot cloud - 312326 \cdot RH + 183308 Rain + 15.2 P_v + 27.3 T \cdot T + 261079 RH \cdot RH - 0.00972 P_v \cdot P_v \quad 2.29$$

Sendo *Rad*, radiação incidente na superfície da fachada [W/m^2], *cloud*, o recobrimento por nuvens¹² [octas], P_v , a pressão de vapor de água, *Rain*, sendo WDR (*Wind-driven rain*) [mm], RH, humidade relativa [%], T, Temperatura [°C].

Method by Nik

Desenvolvido por Nik [27] como *Method by Nik*, este método não é um método específico para a obtenção de um só MRY. Trata-se de um método que sintetiza três tipos de ficheiros climáticos, TDY, *Typical Downscale Year*, ECY, *Extreme Cold Year*, e EWY, *Extreme Warm Year*. Analisando todos os anos de um *multi-year* de trinta anos, principalmente para estudos para os efeitos de alterações climáticas em simulações energéticas, baseando-se em apenas um parâmetro climático, sendo a temperatura do ar por ser o parâmetro climático onde se manifesta o maior impacto das alterações climáticas [27]. A obtenção do ECY e EWY é realizada com o mesmo método utilizado para a obtenção de um TMY (*Typical Meteorological Year*). O método é referido no presente trabalho pois os *Extreme Cold Years* e *Extreme Warm Years* podem ser utilizados como MRY's por representarem anos de referência de climas severos, podendo-se utilizar o ECY para avaliação do risco de ocorrência de mecanismos de degradação, ou também como já referido em outros métodos, pode representar um ano com maior *wetting potential*, por outro lado, o EWY pode representar o ano de referência com maior *drying potential*.

Portanto, se pretender estudar as transferências de humidade e calor de um certo tipo de solução construtiva numa dada localidade, é indicada a utilização de um *Moisture Reference Year (MRY)* por representar as condições climáticas mais severas que incrementam as transferências de humidade, tornando a análise higrotérmica mais exata.

¹² Traduzido pelo autor. Na versão original escreve *cloud cover*.

2.3.4. Limitações atribuídas aos ficheiros climáticos

Na decisão sobre que ficheiro climático construir ter-se-á que ter em consideração 1) que variáveis climáticas selecionar, 2) de que fontes de base de dados poderei obter as variáveis e em que formato e.g formato horário, 3) os locais geográficos em estudo, 4) a finalidade do estudo e 5) que tipo de ficheiro climático obter e com que métodos matemáticos.

Todos os ficheiros climáticos são criados com recurso a dados climáticos registados horariamente num intervalo temporal que engloba variados anos, dados estes que necessitam de ser captados do meio ambiente e sintetizados, tal como referido nos subcapítulos anteriores. Como observado podemos ter ficheiros climáticos que representam condições climáticas extremas e não extremas, i.e. típicas. No entanto, existem limitações na origem destes ficheiros que é necessário referir [7] e ter em consideração aquando da aplicação de *inputs* como ficheiros climáticos e interpretação dos resultados térmicos ou higrotérmicos provenientes destes.

A maioria dos ficheiros climáticos, por serem baseados em dados climáticos recolhidos por poucas estações meteorológicas e afastadas umas das outras, pode tornar a informação com uma margem de erro de tal maneira que, um edifício estudado num certo local, se mudado de local para outro a uma certa distancia do anterior, pode afetar o resultado final da análise desse edifício, tal como, se um ficheiro climático sintetizar a informação de uma vasta área costeira, os dados que se aplicam dentro da zona costeira também podem ser aplicados numa zona interior que esteja englobada na área abrangida por esse ficheiro climático, no entanto, pode gerar erros de análise pois o clima real de uma zona costeira será diferente de uma zona interior.

O facto de muitas estações meteorológicas estarem situadas em aeroportos, representa uma limitação, porque a informação recolhida nessa estação não é necessariamente a mesma que seria recolhida caso a estação se situasse numa cidade.

Quando se está a analisar o desempenho térmico e/ou higrotérmico, utiliza-se registos climáticos horários de anos passados num *multi-year*, significando que a análise é efetuada usando registos de acontecimentos que, obviamente, não se repetirão na sequência exata do passado. Porém, um ficheiro baseado em registos de trinta anos passados terá uma grande probabilidade de ser representativo do clima da década seguinte. Portanto, analisa-se o desempenho de um dado edifício colocando-o no espaço temporal do passado, não conseguindo prever o desempenho num clima futuro devido às alterações climáticas, por exemplo, desde 2000 até 2017, ocorreram nove dos dez anos mais quentes já registados na cidade de Milão [12] implicando que, imaginando se nesse intervalo de tempo um edifício foi projetado usando como *input* um ficheiro climático baseado em dados registados durante cinquenta anos passados, então, a análise térmica e/ou higrotérmica efetuada para esse edifício sobrestimou o efeito do calor ocorrido no verão e todas as condições de conforto associadas. Ainda ao sintetizar todo o *multi-year* num só ano representativo, está a efetuar uma junção de todos os meses mais típicos climaticamente, tal como demonstrado nos subcapítulos anteriores. Portanto, é necessário ter em consideração que será raro a ocorrência de um ano real que se assemelhe a um ano representativo.

3 Escolha dos locais geográficos e respetivo clima

Como já referido, a presente dissertação tem como objetivo a execução de análises higrótérmicas em paredes envolventes típicas em Portugal. Para tal, escolheu-se analisar o comportamento de tais envolventes em diferentes locais de Portugal, de forma a ter uma maior representatividade do clima português nas análises. De forma a caracterizar todo o território português continental optou-se por escolher, para a maioria das localizações, as cidades capitais dos distritos portugueses. Após escolher as localidades, selecionou-se as estações meteorológicas do Instituto Português do Mar e da Atmosfera mais próximas do centro da cidade, para que o clima usado como *input* na análise seja o mais aproximado do clima das localizações escolhidas e por serem zonas de maior densidade populacional, sendo assim, zonas com maior número de habitantes. De referir que a cidade do Porto não foi contemplada no estudo uma vez que a qualidade dos dados obtidos *in situ* não ter sido suficiente para o estudo (foi registado apenas 68640 horas, incluindo falhas de registo *in situ*). As localidades escolhidas foram as seguintes:

- Bragança
- Braga
- Vila Real
- Viana do Castelo
- Guarda
- Viseu
- Aveiro
- Coimbra
- Castelo Branco
- Leiria
- Lisboa
- Santarém
- Portalegre
- Sines
- Évora
- Beja
- Faro



Figura 3.1 - Localizações das estações meteorológicas selecionadas.

Selecionando as cidades, contactou-se o Instituto Português do Mar e da Atmosfera acesso a dados climáticos medidos *in situ* pelas estações meteorológicas mais próximas do centro das respetivas cidades. Foram fornecidos oito anos de dados climáticos horários (2015 a 2022). Após a obtenção dos dados medidos fez-se *download* dos dados climáticos horários simulados ERA5 para os oito anos referidos, com recurso à base de dados do *European Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF) através do Open-meteo [28]. Verificou-se, na Tabela 3.1 que as coordenadas geográficas correspondentes às estações meteorológicas tinham uma ligeira diferença em relação às coordenadas ERA5 para algumas localidades, em cerca de 0,1° de latitude e/ou longitude.

Tabela 3.1 - Representação das coordenadas referentes às estações meteorológicas IPMA e referentes ao ERA5.

Local	Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA)		European Reanalysis 5 (ERA5)	
	Latitude (°)	Longitude (°)	Latitude (°)	Longitude (°)
Bragança	41,8 N	6,7 O	41,8 N	6,8 O
Vila real	41,3 N	7,7 O	41,3 N	7,7 O
Viana do Castelo	41,6 N	8,8 O	41,7 N	8,8 O
Braga	41,6 N	8,5 O	41,6 N	8,4 O
Guarda	40,5 N	7,3 O	40,5 N	7,3 O
Viseu	40,7 N	7,9 O	40,7 N	7,9 O
Aveiro	40,6 N	8,7 O	40,6 N	8,6 O
Coimbra	40,1 N	8,5 O	40,2 N	8,4 O
Castelo Branco	39,8 N	7,5 O	39,8 N	7,5 O
Leiria	39,8 N	8,8 O	39,7 N	8,8 O
Lisboa	38,7 N	9,1 O	38,7 N	9,1 O
Santarém	39,2 N	8,7 O	39,2 N	8,7 O
Portalegre	39,3 N	7,4 O	39,3 N	7,4 O
Évora	38,5 N	7,9 O	38,6 N	7,9 O
Setúbal	38,5 N	8,9 O	38,5 N	8,9 O
Beja	38,0 N	7,9 O	38,0 N	7,9 O
Faro	37,0 N	7,9 O	37,0 N	7,9 O

Ao analisar os dados climáticos medidos, constatou-se a existência de falhas de medição para as sete variáveis climáticas escolhidas, sendo comum para todas as localidades selecionadas. Para corrigir estes erros foi necessário quantificar o número de falhas que terão de ser substituídas por outros dados, quer através de uma substituição direta a partir dos dados simulados ERA5 i.e eliminar as falhas horárias dos ficheiros climáticos com dados medidos e inserir os valores das variáveis climáticas simuladas, ou através da execução de interpolações nos dados relativos às medições *in situ*. A Tabela 3.2 apresenta a quantificação dos erros no âmbito das 70127 horas analisadas para cada variável climática relativa a cada localidade selecionada

Tabela 3.2 - Quantificação dos erros de medição dos dados climáticos IPMA em quantidade de horas, referentes aos oito anos de dados horários. T – Temperatura; HR – Humidade Relativa; Patm – Pressão atmosférica; Precipitação; Vel.Vento – Velocidade do vento; Dir. Vento – Direção do Vento; RG – Radiação Global.

Localização	Variáveis climáticas						
	T	HR	Patm	Precip.	Vel.Vento	Dir.Vento	RG
Falhas de medição (horas)							
Aveiro	412	1973	29433	1363	14705	412	438
Beja	4952	92	5145	5247	9700	4952	133
Braga	214	14803	70127	8752	31228	214	300
Bragança	604	604	605	1297	644	604	7246
Castelo Branco	45	45	3326	58	35	45	49932
Coimbra	1100	5987	4330	1220	1045	1100	7104
Évora	414	10955	3959	669	405	414	50549
Faro	416	459	3468	1448	7972	416	441
Guarda	728	2250	70128	1142	734	728	636
Leiria	2289	448	29590	4212	1539	2289	682
Lisboa	119	7008	3128	2890	54478	119	54879
Portalegre	2697	353	15688	2213	3392	2697	372
Santarém	381	12666	42799	4925	528	381	503
Sines	505	1106	3544	634	7196	505	580
Viana do Castelo	6573	10786	3300	1682	37365	6573	52079
Vila Real	219	219	3343	276	195	219	254
Viseu	342	350	6323	372	383	342	70116

Tabela 3.3 - Quantificação dos erros de medição dos dados climáticos IPMA em percentagem, referentes a oito anos de dados horários. T – Temperatura; HR – Humidade Relativa; Patm – Pressão atmosférica; Precipitação; Vel.Vento – Velocidade do vento; Dir. Vento – Direção do Vento; RG – Radiação Global.

Localização	Variáveis climáticas						
	T	HR	Patm	Precip.	Vel.Vento	Dir.Vento	RG
Falhas de medição (%)							
Aveiro	0,6	2,8	42,0	1,9	21,0	0,6	0,6
Beja	7,1	0,1	7,3	7,5	13,8	7,1	0,2
Braga	0,3	21,1	100,0	12,5	44,5	0,3	0,4
Bragança	0,9	0,9	0,9	1,8	0,9	0,9	10,3
Castelo Branco	0,1	0,1	4,7	0,1	0,0	0,1	71,2
Coimbra	1,6	8,5	6,2	1,7	1,5	1,6	10,1
Évora	0,6	15,6	5,6	1,0	0,6	0,6	72,1
Faro	0,6	0,7	4,9	2,1	11,4	0,6	0,6
Guarda	1,0	3,2	100,0	1,6	1,0	1,0	0,9
Leiria	3,3	0,6	42,2	6,0	2,2	3,3	1,0
Lisboa	0,2	10,0	4,5	4,1	77,7	0,2	78,3
Portalegre	3,8	0,5	22,4	3,2	4,8	3,8	0,5
Santarém	0,5	18,1	61,0	7,0	0,8	0,5	0,7
Sines	0,7	1,6	5,1	0,9	10,3	0,7	0,8
Viana do Castelo	9,4	15,4	4,7	2,4	53,3	9,4	74,3
Vila Real	0,3	0,3	4,8	0,4	0,3	0,3	0,4
Viseu	0,5	0,5	9,0	0,5	0,5	0,5	100,0

3.1. Validação das variáveis climáticas, comparação de dados medidos e simulados

Para que a simulação efetuada na presente dissertação seja reproduzida num clima exterior representativo da realidade, é necessário avaliar a exatidão das variáveis climáticas que foram obtidas por via de diferentes fontes de informação.

Para introduzir dados ERA5 como substituição de erros medidos é preciso avaliar se as variáveis climáticas ERA5 correspondentes às localizações são concordantes com as variáveis climáticas medidas pelo IPMA. Para tal, é preciso comparar as variáveis medidas com as simuladas, pois se os valores simulados inseridos em substituição dos erros de medição forem provenientes de um ficheiro, onde a totalidade dos seus valores é significativamente diferente da totalidade dos valores das variáveis medidas pelo IPMA, o ficheiro climático criado em função dessas variáveis não terá a representatividade do clima adequada para que a análise higrótermica seja representativa de uma situação real [29].

Como se pode observar na Figura 3.2, existem localizações cujos dados medidos *in situ* apresentaram falhas significativas para certas variáveis climáticas, que dificultaram a comparação entre os dados IPMA e ERA5 tal são os casos de Braga e Guarda relativamente à variável da pressão atmosférica cuja comparação não foi possível realizar. A Figura 3.2 é referente a Santarém apresentando uma sobreposição do gráfico de linhas que contém os valores captados *in situ* provenientes do Instituto Português do Mar e da Atmosfera com o gráfico de linhas que contém os valores simulados ERA5. Como calculado e demonstrado na Tabela 3.3, Santarém apresenta falhas na ordem das 42799 horas, sendo 61% das horas analisadas ao longo dos oito anos, para a variável climática da pressão atmosférica.

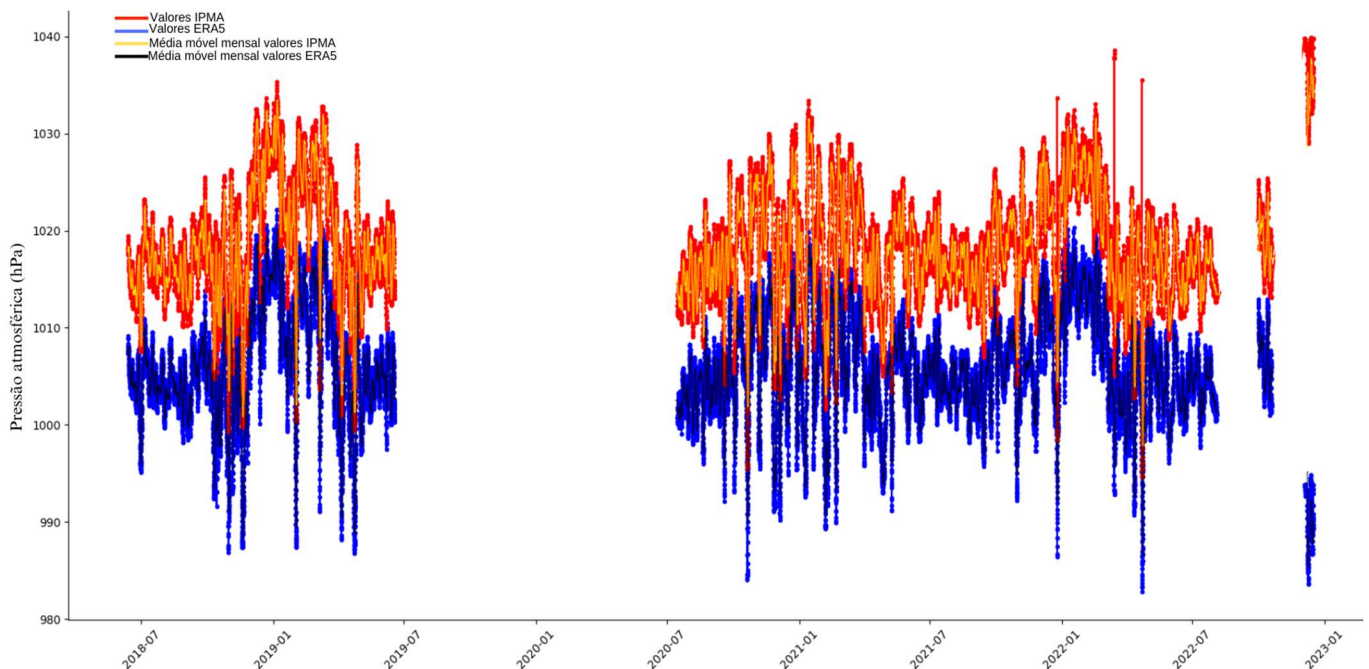


Figura 3.2 - Sobreposição de gráficos de linhas dos valores horários medidos (IPMA) e simulados (ERA5) para a localização de Santarém.

3.1.1. Método visual

A primeira avaliação sobre a validação dos dados climáticos foi efetuada recorrendo a um método visual, através da sobreposição em gráfico de linhas, dos valores das variáveis medidas IPMA e simuladas ERA5 para todas as localizações selecionadas e para sete variáveis climáticas associadas às localizações, sendo as seguintes variáveis: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Humidade Relativa (%), Pressão Atmosférica (hPa), Precipitação (mm), Radiação Global (W/m^2), Velocidade do vento (m/s) e Direção do vento ($^{\circ}$).

3.1.1.1. Média Móvel Mensal

Dada a existência de falhas nos dados medidos *in situ*, teve de se proceder à eliminação dessas falhas antes de se efetuar as comparações. No entanto, para se efetuar uma comparação coerente, a eliminação das variáveis climáticas simuladas correspondentes às datas onde se identificaram falhas teve de ser executada, o que originou uma maior escassez de dados para comparação, em alguns casos apenas umas meras horas foram comparadas devido a uma existência significativa de falhas tal como pode ser observado nas tabelas deste capítulo.

Dado que a eliminação das falhas horárias resultou numa redução de horas usadas para comparação, uma Média Móvel Mensal combinada com a sobreposição dos dados horários, foi utilizado para se observar com maior clareza as tendências na variação dos dados medidos para os simulados, dado que para certas localizações e variáveis poderá constatar-se uma sobreposição significativa entre as variáveis para certas localizações enquanto para outras variáveis e respetivas localizações há maiores variações. Contudo, é possível verificar na observação das figuras abaixo que a variabilidade ao longo do tempo dos valores, tanto medidos como simulados, é a mesma, indicando que há uma exatidão significativa na tradução da variabilidade do clima ao longo do tempo.

As figuras abaixo apresentadas, são referentes a localizações com climas diferenciados. Representando variados climas do território português, apresentam variáveis climáticas comparadas visualmente e apresentam as falhas de medição localizadas no período cronológico. Outras comparações visuais para localizações que não foram apresentadas no corpo do texto da dissertação serão apresentadas no Anexo A.

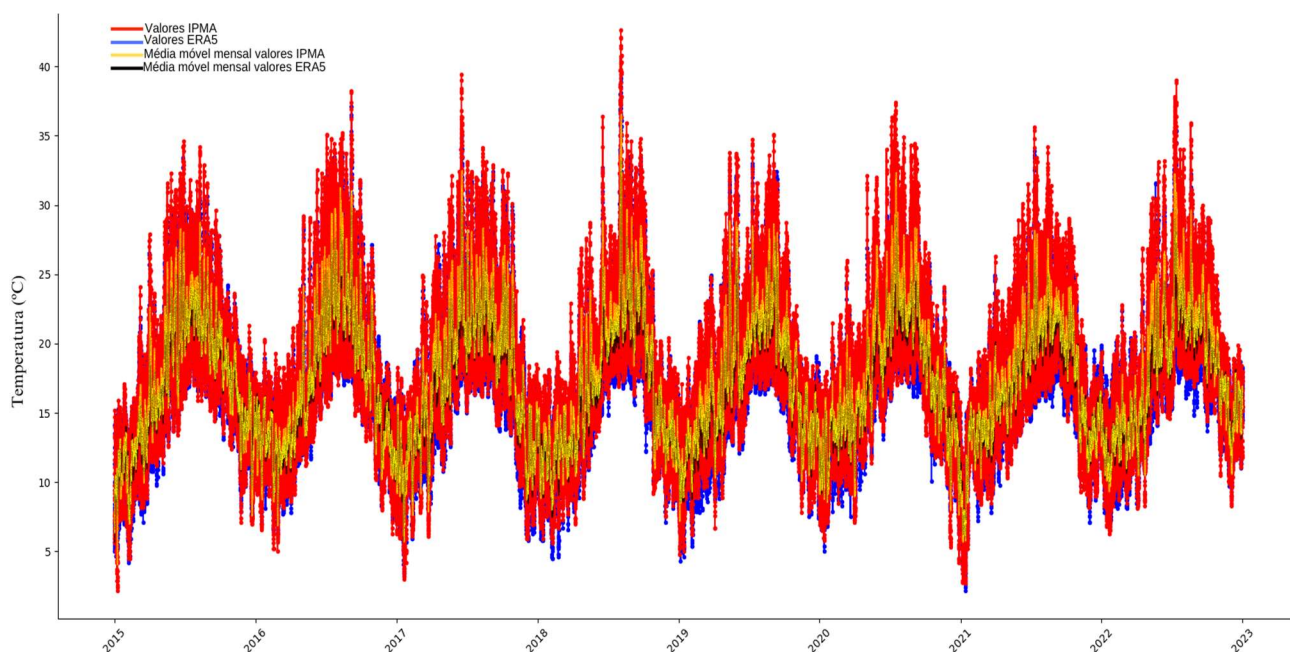


Figura 3.3 - Sobreposição de gráficos de linhas dos valores horários medidos (IPMA) e simulados (ERA5) para a localização de Lisboa.

Como se pode observar a comparação dos valores medidos e simulados para a variável temperatura na Figura 3.3, existe uma variabilidade nos valores de temperatura com a mesma tendência para os valores ERA5

e valores provenientes do IPMA, apresentando os mesmos declives negativos como positivos, nos mesmos momentos dos anos. O mesmo pode ser observado na média móvel mensal calculada para cada fonte de valores climáticos. Para se perceber se a diferença entre valores medidos e simulados era coerente com o gráfico observado, calculou-se as médias de temperaturas para todos os anos em análise e a mediana, tal como pode ser observado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Cálculo da média e mediana para os valores horários da temperatura provenientes do IPMA e ERA5.

	Anos	Temperatura IPMA (°C)		Temperatura ERA5 (°C)		Δ Temperatura média (IPMA - ERA5)
		Média	Mediana	Média	Mediana	
LISBOA	2015	17,2	17,1	16,8	16,8	0,4
	2016	17,3	16,3	16,9	16,1	0,4
	2017	17,7	17,5	17,1	16,9	0,6
	2018	17,1	16,2	16,4	15,5	0,7
	2019	17,4	16,9	16,7	16,5	0,7
	2020	17,6	16,9	17,0	16,5	0,6
	2021	17,2	16,8	16,6	16,3	0,6
	2022	17,9	17,6	17,4	17,2	0,5

Os resultados apresentados sobre os cálculos da média e mediana, foram efetuados para a localização de Lisboa para a variável climática temperatura por ser a uma das localizações que apresentam menos falhas de medição *in situ*, apenas 0,2% de falhas para a temperatura, não comprometendo em demasia o cálculo da média e mediana. Como se pode observar as diferenças entre os valores horários medidos pelo IPMA e simulados ERA5 é baixa, variando desde os 0,4°C aos 0,7°C, sendo coerente com o observado na Figura 3.3, pois os valores medidos apresentam-se superiores aos valores ERA5. Friis et.al [30], efetuou uma comparação entre um *Test Reference Year* produzido com valores de variáveis horárias medidas e um TRY produzido com valores simulados, obteve uma diferença de 0,65°C entre os valores medidos *in situ* e simulados, a mesma gama de valores pode ser observada para a localização de Lisboa entre os valores medidos *in situ* IPMA e simulados ERA5.

Na Tabela 3.5 são apresentados os cálculos das diferenças entre a média de temperatura registada com os valores medidos e com os valores ERA5 para cada estação climática de cada ano, sendo que, para o território Português, a estação de Inverno tem o seu começo em 22 de dezembro e o seu término a 20 de março, a Primavera tem o seu começo a 20 de março e término a 20 de junho, o Verão tem o seu começo a 20 de junho e término a 22 de setembro e o Outono tem o seu começo a 22 de setembro e término a 22 de dezembro. Pode observar-se com maior detalhe, por trechos dos anos, onde existem maiores diferenças entre os dados. Observa-se que a maior variação de valores se encontra nas estações da Primavera e Verão, obtendo-se uma diferença máxima de 1,3°C entre valores medidos e simulados. Portanto, em média, a maior diferença entre valores provenientes do IPMA e ERA5 seria de 1,3°C para Lisboa, no ano 2020 na estação do Verão. Segundo Friis et.al [31], a diferença de 1,3°C não é significativa, estando dentro do limite aceitável de 5°C estabelecido pelos autores. Consegue-se assim afirmar que visualmente os dados simulados ERA5 são aceitáveis para usar como substitutos dos erros de medição. Adiante neste capítulo será apresentado os resultados dos índices estatísticos usados para a comparação dos dados que ajudam a complementar o observado.

Tabela 3.5 - Cálculo das diferenças de média de temperatura para as estações climáticas de cada ano.

	Anos	Estações climáticas			
		Inverno	Primavera	Verão	Outono
LISBOA	2015	0,0	0,8	0,5	0,2
	2016	0,0	0,8	0,9	0,2
	2017	0,2	1,0	0,8	0,2
	2018	0,4	1,1	1,2	0,1
	2019	0,8	0,9	0,8	0,1
	2020	0,5	0,9	1,3	0,2
	2021	0,1	0,8	1,1	0,0
	2022	0,1	1,0	1,1	0,1
		Δ Temperatura média (IPMA - ERA5)			

Na Tabela 3.6 estão presentes os resultados relativamente aos cálculos das diferenças entre os máximos e mínimos das temperaturas relativamente às estações climáticas de cada um dos anos em análise. As maiores diferenças entre temperaturas registadas *in situ* e simuladas estão nas temperaturas máximas registadas para cada ano, havendo no máximo uma diferença de 4,8°C correspondentes ao ano de 2020, estações de Primavera e Verão. A menor diferença para as temperaturas máximas, encontra-se no ano de 2019, estação de Inverno, onde não existe diferença entre o valor máximo registado pelo IPMA e o valor máximo simulado ERA5. Para as temperaturas mínimas, a maior diferença é de 2,0°C correspondente aos anos de 2015 e 2019, para as estações de Inverno e Primavera correspondentemente, quanto à temperatura mínima, o ano de 2021 apresenta os valores que coincidem mais vezes entre os registados *in situ* e simulados, podendo observar-se que não existem diferenças para as estações de Inverno, Primavera e Verão.

Consegue-se assim, obter uma análise mais detalhada sobre a relação entre os dados provenientes do Instituto Português do Mar e da Atmosfera e ERA5. Poderá concluir-se visualmente que, à partida, os dados simulados podem ser utilizados para colmatar os erros de medição encontrados pois apresentam uma coerência entre os valores provenientes de cada fonte, contudo, uma análise estatística foi efetuada no subcapítulo 3.1.2 para se obter maiores certezas sobre a relação entre os dados.

Tabela 3.6 - Cálculo da diferença entre as temperaturas máxima e mínima para os valores medidos e simulados, para cada ano e correspondentes estações climáticas.

	Anos	Estações climáticas							
		Inverno	Primavera	Verão	Outono	Inverno	Primavera	Verão	Outono
LISBOA	2015	2,2	0,8	3,2	1,5	2,0	1,4	0,0	0,0
	2016	1,4	3,5	1,1	0,5	1,4	0,8	0,9	1,0
	2017	1,0	3,5	1,1	0,5	0,0	0,5	0,4	0,1
	2018	3,8	3,7	3,4	0,6	1,1	0,9	1,3	0,4
	2019	0,0	1,3	2,1	1,8	0,5	2,0	0,3	0,4
	2020	1,6	4,8	4,8	0,7	0,8	0,6	0,1	0,3
	2021	1,4	3,8	1,7	1,2	0,0	0,0	0,0	1,1
	2022	0,4	1,6	3,6	0,0	0,7	0,1	0,1	0,6
Δ Temperatura máxima (IPMA - ERA5)						Δ Temperatura mínima (IPMA - ERA5)			

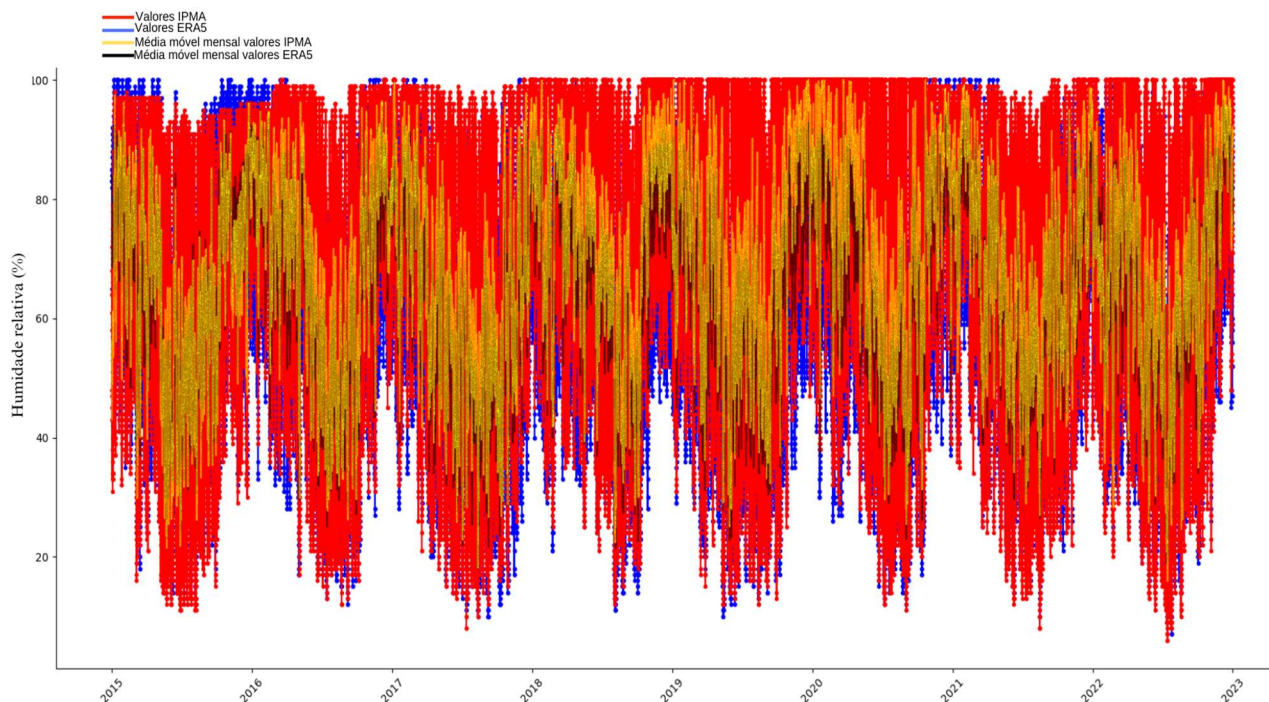


Figura 3.4 - Sobreposição de gráficos de linhas dos valores horários medidos (IPMA) e simulados (ERA5) para a localização de Beja.

Na Figura 3.4, pode observar-se a comparação entre os valores provenientes do IPMA e ERA5 para a localização de Beja, sendo a localização que menos erros de medição *in situ* teve, apenas 0,2% de falhas de medição que se traduziram em 92 horas de erros de medição. Consegue-se observar o que já tinha acontecido para a variável climática da temperatura, ou seja, é uma variabilidade de valores igual, tanto para os valores medidos como simulados. Pode observar-se a mesma tendência de variação de valores para a média móvel mensal ao longo dos oito anos analisados.

Os resultados apresentados na Tabela 3.7 são referentes ao cálculo da média e mediana para os valores relativo à variável climática da humidade relativa correspondente à Figura 3.4. Observa-se que para cada ano do período analisado as diferenças das médias anuais variam entre 0,2% e 8,3% o que não apresenta um problema para a utilização dos dados simulados para colmatar as falhas de medição *in situ*. Friis et.al [31], referiu como aceitável as diferenças até 10% para a variável climática, humidade relativa, na comparação que fez entre os valores de um TRY criado com dados medidos e os valores de um TRY criado com dados simulados. Os resultados apresentados são coerentes com a tendência de variabilidade dos valores, observada na Figura 3.4.

Tabela 3.7 - Cálculo da média e mediana para os valores horários da humidade relativa provenientes do IPMA e ERA5.

	Anos	Humidade Relativa IPMA (%)		Humidade Relativa ERA5 (%)		Δ Humidade Relativa média (IPMA - ERA5)
		Media	Mediana	Media	Mediana	
BEJA	2015	64,4	68,0	64,1	66,0	0,2
	2016	69,2	74,0	64,9	67,0	4,4
	2017	63,5	65,0	58,7	59,0	4,8
	2018	73,5	79,0	67,3	70,0	6,3
	2019	71,1	75,0	62,8	65,0	8,3
	2020	74,4	81,0	66,4	69,0	8,0
	2021	68,4	72,0	64,9	67,0	3,6
	2022	67,6	71,0	64,1	66,0	3,4

Na Tabela 3.8 são apresentados os cálculos das diferenças entre a média de humidade relativa registada com os valores medidos e com os valores ERA5 para cada estação climática de cada ano analisado. Podendo observar-se com maior detalhe, por trechos dos anos, onde existem maiores diferenças entre os dados. Observa-se que a maior variação de valores se encontra nas estações da Primavera e Outono, obtendo-se uma diferença máxima de 17,7% entre valores medidos e simulados. O valor observado fica acima do intervalo de 10% de diferença determinado como aceitável, contudo é apenas a única estação climática com essa falha, não se repetindo em nenhum outro ano a dimensão do valor, ao que se pode determinar como aceitável os valores simulados ERA5 na sua generalidade. Portanto, em média, a maior diferença entre valores provenientes do IPMA e ERA5 seria de 17,7% para Santarém, no ano 2016 na estação de Outono. Adiante neste capítulo será apresentado os resultados dos índices estatísticos usados para a comparação dos dados, ajudando a complementar o observado.

Tabela 3.8 - Cálculo das diferenças de média de humidade relativa para as estações climáticas de cada ano.

	Anos	Estações climáticas			
		Inverno	Primavera	Verão	Outono
BEJA	2015	1,0	1,7	0,4	2,1
	2016	4,3	5,4	4,3	17,7
	2017	3,6	6,1	5,8	3,6
	2018	5,2	6,2	6,0	7,6
	2019	5,2	9,9	8,4	9,6
	2020	9,5	10,3	7,7	4,6
	2021	2,6	4,6	4,3	2,4
	2022	1,9	4,8	4,2	2,6
		Δ Humidade Relativa média (IPMA - ERA5)			

Sobre as comparações visuais, poderá observar-se na Tabela 3.2 a densidade de erros de medição que reduziram o número de horas disponíveis para comparação.

É possível, observar alguma concordância entre valores medidos e simulados para as variáveis de temperatura, humidade relativa e radiação global ao longo do período cronológico em análise, contudo observou-se diferenças significativas para as variáveis, precipitação, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, salvo algumas exceções para as localizações apresentadas. Relativamente à variável climática de pressão atmosférica, para as localizações de Aveiro e Faro é possível observar diferenças pouco significativas entre os valores medidos e simulados, nas regiões de Bragança, Portalegre, Évora e Lisboa, as diferenças são significativas. Para a variável climática de precipitação, observou-se que as diferenças são bastante significativas para a maioria das localizações selecionadas. A variável climática de velocidade do vento também apresenta visualmente diferenças pouco satisfatórias, no que diz respeito a uma maior aproximação pretendida entre valores medidos e simulados, para todas as localizações selecionadas. A variável climática de direção do vento, dada a densidade de valores não foi possível declarar uma observação concreta dos resultados. Os gráficos relativos às localizações mencionadas que não se encontrem no corpo do texto estarão disponíveis no Anexo A

3.1.2. Método estatístico

Dada a densidade visual de valores climáticos ao longo dos oito anos de dados, os erros de medição e visto que se trata de sete variáveis climáticas referentes a dezassete localizações, a análise visual por ser exaustiva poderá provocar a ocorrência de erros de interpretação sobre a análise dos valores na comparação entre valores simulados e medidos, não sendo suficiente para provar a exatidão dos valores. Por isso, para mitigar o erro humano, a realização da operação de índice estatísticos sobre a exatidão entre os valores medidos e

simulados foi efetuada para todas localizações selecionadas e para as sete variáveis analisadas visualmente, para se poderem retirar conclusões mais concretas acerca dos valores simulados e sua viabilidade para colmatção de erros de medição. Os índices estatísticos utilizados para os cálculos de exatidão poderão ser consultados no Anexo E.

Está demonstrado nas figuras em baixo os resultados dos índices de exatidão estatística para as localizações selecionadas de Aveiro, Bragança, Portalegre, Lisboa, Évora e Faro. Os restantes resultados serão apresentados no Anexo A.

Na Tabela 3.9 estão apresentados os resultados dos cálculos dos índices estatísticos *Coefficient of determination* (R^2), *Range Normalized Root Mean Square Error* (RN_RMSE) e *Mean Bias Error* (MBE) para três cidades representativas do clima na região Norte de Portugal continental, Bragança, Braga e Viseu. Na localização de Bragança pode observar-se um resultado ótimo, tanto para R^2 como para RN_RMSE e MBE para a variável climática temperatura, interpretando-se que os valores medidos e ERA5 são coerentes entre si, sendo assim aceitável a utilização dos valores simulados ERA5 para a temperatura como substitutos dos erros de medição *in situ*; para a variável climática humidade relativa, apresentam resultados mais fracos que os da temperatura mas ainda assim dentro dos limites definidos como aceitáveis para cada índice estatístico, indicando apenas pelo índice MBE que os valores ERA5 sobrestimam muito pouco os valores *in situ*, querendo dizer que, os valores simulados para a humidade relativa encontram-se em alguns pontos maiores que os valores medidos; a variável climática pressão atmosférica falha nos testes de exatidão para todos os índices estatísticos, não apresentando resultados favoráveis; a variável precipitação apresenta valores baixos para os intervalos de valores aceitáveis para cada índice estatístico querendo isto dizer que para a região de Bragança os valores medidos estão bastante distantes dos valores simulados, poderá interpretar-se através do resultado do índice MBE de -14,24%, que os valores ERA5 são muito elevados em comparação com os medidos; a variável velocidade do vento apresenta um valor negativo para o resultado do índices de exatidão estatística R^2 e um bom resultado para o índice RN_RMSE, acompanhado por um valor de MBE muito próximo de 0, o que indica que os valores ERA5 sobrestimam muito pouco os valores *in situ*, com base nos dois resultados poderá considerar-se aceitável os valores simulados para a esta variável climática; a variável climática direção do vento apresenta um resultado ligeiramente negativo para o índice R^2 e RN_RMSE ficando um pouco distante do limite de aceitação; a variável radiação global apresenta resultados ótimos quanto aos valores dos índices de exatidão estatística. Na localização de Braga, os resultados dos índices estatísticos para a variável temperatura são ótimos para R^2 , RN_RMSE e MBE sendo aceitável a utilização dos valores simulados ERA5 para substituírem os erros de medição *in situ*; para a variável humidade relativa, o resultado do índice R^2 está ligeiramente abaixo do aceitável contudo o resultado para o índice RN_RMSE é um bom resultado e o valor de MBE indica também que os valores ERA5 e medidos são coerentes entre si, torna assim os valores ERA5 aceitáveis para a variável humidade relativa; a variável pressão atmosférica não apresenta valores para os índices estatísticos devido ao facto de os erros de medição em Braga foram de 100%, obrigando a que seja utilizado os valores ERA5; a variável precipitação apresenta um resultado bastante negativo relativamente ao intervalo de valores aceitáveis para o índice estatístico R^2 mas apresenta um resultado ótimo para o índice RN_RMSE, porém, o valor de MBE indica que existe uma sobrestimação significativa dos valores simulados sobre os medidos, é assim necessária cautela na utilização dos valores ERA5 como substitutos dos erros de medição; a variável velocidade do vento apresenta um mau resultado quanto ao valor do R^2 e um resultado dentro do aceitável para RN_RMSE porém o valor MBE indica uma sobrestimação significativa dos valores simulados sobre os medidos, é necessária cautela na utilização dos valores ERA5 para esta variável climática; a variável direção do vento apresenta resultados não aceitáveis para todos os índices estatísticos; a variável radiação global apresenta resultados ótimos quanto aos valores dos índices de exatidão estatística. Na localização de Viseu, os resultados dos índices estatísticos para a variável temperatura são ótimos para R^2 , RN_RMSE e MBE sendo aceitável a utilização dos valores simulados ERA5 para substituírem os erros de medição *in situ*; para a variável humidade relativa, o resultado do índice R^2 está ligeiramente abaixo do aceitável contudo o resultado para o índice RN_RMSE é um bom resultado e o valor de MBE indica também que

os valores ERA5 e medidos são coerentes entre si, torna assim os valores ERA5 aceitáveis para a variável humidade relativa; a variável pressão atmosférica apresenta um resultado satisfatório para o índice R^2 , e um mau resultado para o índice RN_RMSE contudo, o resultado do índice estatístico MBE de 5,53% indica uma ligeira subestimação dos valores ERA5 relativamente aos valores medidos, querendo dizer que os valores simulados poderão estar ligeiramente abaixo dos valores medidos, sendo necessária cautela na utilização dos valores ERA5 para esta variável na utilização para substituir erros de medição ; a variável precipitação apresenta um resultado bastante negativo relativamente ao intervalo de valores aceitáveis para o índice estatístico R^2 mas apresenta um resultado ótimo para o índice RN_RMSE e o valor de MBE é satisfatório, tornando aceitável a utilização dos valores simulados para esta variável ; a variável velocidade do vento apresenta um mau resultado quanto ao valor do R^2 e um resultado dentro do aceitável para RN_RMSE e MBE; a variável direção do vento apresenta resultados não aceitáveis para todos os índices estatísticos; a variável radiação global não apresenta valores para os índices estatísticos devido ao facto de os erros de medição em Viseu foram de 100%, obrigando a que seja utilizado os valores ERA5.

Tabela 3.9 - Cálculo dos índices de exatidão entre os valores registados *in situ* e os valores simulados, para cada variável climática. Região Norte de Portugal continental

Variáveis climáticas	Região Norte de Portugal continental								
	Bragança			Braga			Viseu		
	R^2	RN_RMSE	MBE	R^2	RN_RMSE	MBE	R^2	RN_RMSE	MBE
Temperatura	0,90	3%	0,0021	0,90	4%	0,0523	0,92	4%	-
Humidade relativa	0,79	10%	-	0,63	11%	0,0147	0,65	13%	-
Pressão atmosférica	0,00	100%	0,0828	-	-	-	0,73	80%	5,530
Precipitação	0,15	1%	-14,24	0,19	2%	-40,51	0,15	2%	0,880
Velocidade do vento	0,20	10%	-	0,19	15%	-0,4068	0,11	13%	0,5613
Direção do vento	0,55	36%	0,1081	0,20	33%	0,0733	0,19	27%	0,0684
Radiação global	0,92	6%	0,0178	0,929	6%	-0,0191	-	-	-

Na Tabela 3.10 estão apresentados os resultados dos cálculos dos índices estatísticos *Coefficient of determination* (R^2), *Range Normalized Root Mean Square Error* (RN_RMSE) e *Mean Bias Error* (MBE) para três cidades representativas do clima na região Centro de Portugal continental, Coimbra, Leiria e Castelo Branco. Na localização de Coimbra pode observar-se um resultado ótimo, tanto para R^2 como para RN_RMSE e MBE para a variável climática temperatura, interpretando-se que os valores medidos e ERA5 são coerentes entre si, sendo assim aceitável a utilização dos valores simulados ERA5 para a temperatura como substitutos dos erros de medição *in situ*; para a variável climática humidade relativa, apresentam resultados ótimos para cada índice estatístico, querendo dizer que, os valores simulados para a humidade relativa poderão ser utilizados para substituírem os erros de medição; a variável climática pressão atmosférica falha no teste de exatidão para o índice estatístico R^2 apresentando um mau resultado, mas para o índice RN_RMSE encontra-se dentro

do intervalo de valor aceitável e um valor de MBE que indica coerência entre os valores simulados e medidos, podendo assim ser utilizado os valores ERA5 como substitutos dos erros de medição; a variável precipitação apresenta um valor muito baixo para R^2 e um valor aceitável para o índice RN_RMSE complementando-se com o valor de MBE que indica uma coerência entre valores, querendo isto dizer que é aceitável a utilização dos valores ERA5; a variável velocidade do vento apresenta um valor ligeiramente abaixo do aceitável para R^2 e um valor bom para o índice RN_RMSE e MBE, com base nos dois resultados poderá considerar-se aceitável os valores simulados para a esta variável climática; a variável climática direção do vento apresenta um resultado negativo para o índice R^2 e RN_RMSE; a variável radiação global apresenta resultados ótimos quanto aos valores dos índices de exatidão estatística, sendo aceitável a utilização dos valores simulados ERA5. Na localização de Leiria, os resultados dos índices estatísticos para a variável temperatura são ótimos para R^2 , RN_RMSE e MBE sendo aceitável a utilização dos valores simulados ERA5 para substituírem os erros de medição *in situ*; para a variável humidade relativa, o resultado do índice R^2 está ligeiramente abaixo do aceitável contudo o resultado para o índice RN_RMSE é um bom resultado e o valor de MBE indica também que os valores ERA5 e medidos são coerentes entre si, torna assim os valores ERA5 aceitáveis para a variável humidade relativa; a variável pressão atmosférica apresenta um resultado ligeiramente abaixo do aceitável para o valor do índice R^2 e um ótimo resultado para os índices RN_RMSE e MBE, tornando aceitável a utilização dos valores ERA5; a variável precipitação apresenta um resultado bastante negativo relativamente ao intervalo de valores aceitáveis para o índice estatístico R^2 mas apresenta um resultado ótimo para o índice RN_RMSE, porém, o valor de MBE indica que existe uma sobrestimação significativa dos valores simulados sobre os medidos, é assim necessária cautela na utilização dos valores ERA5 como substitutos dos erros de medição; a variável velocidade do vento apresenta um bom resultado quanto ao valor do R^2 e um resultado mau resultado para RN_RMSE porém o valor MBE indica uma sobrestimação ligeira dos valores simulados sobre os medidos, poderá ser considerado aceitável a utilização dos valores ERA5 para esta variável climática; a variável direção do vento apresenta resultados não aceitáveis para todos os índices estatísticos; a variável radiação global apresenta resultados ótimos quanto aos valores dos índices de exatidão estatística. Na localização de Castelo Branco, os resultados dos índices estatísticos para a variável temperatura são ótimos para R^2 , RN_RMSE e MBE sendo aceitável a utilização dos valores simulados ERA5 para substituírem os erros de medição *in situ*; para a variável humidade relativa, o resultado do índice R^2 está no limite do aceitável contudo o resultado para o índice RN_RMSE é um bom resultado e o valor de MBE indica também que os valores ERA5 e medidos são coerentes entre si, torna assim os valores ERA5 aceitáveis para a variável humidade relativa; a variável pressão atmosférica apresenta um resultado ligeiramente abaixo do intervalo de valores aceitável para o índice R^2 , e um mau resultado para o índice RN_RMSE contudo, o resultado do índice estatístico MBE indica coerência entre os valores ERA5 e medidos *in situ*, tornando aceitável a utilização dos valores ERA5 como substitutos dos erros de medição; a variável precipitação apresenta um resultado bastante negativo relativamente ao intervalo de valores aceitáveis para o índice estatístico R^2 mas apresenta um resultado ótimo para o índice RN_RMSE e o valor de MBE é satisfatório, tornando aceitável a utilização dos valores simulados para esta variável ; a variável velocidade do vento apresenta um mau resultado quanto ao valor do R^2 e um resultado bom para RN_RMSE e MBE; a variável direção do vento apresenta resultados não aceitáveis para todos os índices estatísticos; a variável radiação global apresenta resultados ótimos para os índices estatísticos, tornando aceitável a utilização dos valores ERA5 para esta variável climática.

Tabela 3.10 - Cálculo dos índices de exatidão entre os valores registados *in situ* e os valores simulados, para cada variável climática. Região Centro de Portugal continental

	Região Centro de Portugal continental								
	Coimbra			Leiria			Castelo Branco		
Variáveis climáticas	R ²	RN_RMSE	MBE	R ²	RN_RMSE	MBE	R ²	RN_RMSE	MBE
Temperatura	0,91	4%	-0,011	0,74	4%	-0,03	0,94	4%	0,0727
Humidade relativa	0,97	1%	0,0622	0,54	10%	-0,0072	0,74	12%	-0,0574
Pressão atmosférica	0,19	16%	0,0107	0,55	9%	0,0038	0,66	73%	0,0490
Precipitação	0,02	19%	-0,0256	0,01	1%	0,0665	0,01	1%	0,1595
Velocidade do vento	0,53	8%	-0,1229	0,82	24%	-0,5279	0,52	8%	-0,0015
Direção do vento	0,08	29%	-0,0646	0,04	33%	0,0302	0,22	25%	-0,0537
Radiação global	0,93	6%	-0,0248	0,91	7%	-0,0819	0,93	6%	-0,0051

Na Tabela 3.11 estão apresentados os resultados dos cálculos dos índices estatísticos *Coefficient of determination* (R²), *Range Normalized Root Mean Square Error* (RN_RMSE) e *Mean Bias Error* (MBE) para três cidades representativas do clima na região de Lisboa e Alto Alentejo de Portugal continental, Lisboa, Santarém e Portalegre. Na localização de Lisboa pode observar-se um resultado ótimo, tanto para R² como para RN_RMSE e MBE para a variável climática temperatura, interpretando-se que os valores medidos e ERA5 são coerentes entre si, sendo assim aceitável a utilização dos valores simulados ERA5 para a temperatura como substitutos dos erros de medição *in situ*; para a variável climática humidade relativa, apresentam um resultado ligeiramente abaixo do limite do aceitável para o índice R² e um bom resultado para o índice RN_RMSE e MBE, podendo-se concluir que os valores simulados para a humidade relativa poderão ser utilizados para substituírem os erros de medição; a variável climática pressão atmosférica falha no teste de exatidão para o índice estatístico R² apresentando um mau resultado, mas para o índice RN_RMSE encontra-se dentro do intervalo de valor aceitável e um valor de MBE que indica coerência entre os valores simulados e medidos, podendo assim ser utilizado os valores ERA5 como substitutos dos erros de medição; a variável precipitação apresenta valores pouco favoráveis quanto aos índices de exatidão estatística, sendo muito baixo para R² e RN_RMSE, podendo dizer que falha na validação dos valores ERA5 como aceitáveis para a utilização como substitutos dos erros de medição; a variável velocidade do vento apresenta um valor negativo quanto à validação relativamente ao índice R² e um valor bom para o índice RN_RMSE, contudo o valor de MBE indica uma ligeira sobrestimação dos valores ERA5 sobre os medidos mas com base nos dois resultados poderá considerar-se aceitável os valores simulados para a esta variável climática; a variável climática direção do vento apresenta um resultado negativo para o índice R² e RN_RMSE; a variável radiação global apresenta resultados ótimos quanto aos valores dos índices de exatidão estatística, sendo aceitável a utilização dos valores simulados ERA5. Na localização de Santarém, os resultados dos índices estatísticos para a variável temperatura são ótimos para R², RN_RMSE e MBE sendo aceitável a utilização dos valores simulados ERA5 para substituírem os erros de medição *in situ*; para a variável humidade relativa, o resultado do índice R² e RN_RMSE é um ótimo resultado e o valor de MBE indica que os valores ERA5 e medidos são coerentes entre si, torna assim

os valores ERA5 aceitáveis para a variável humidade relativa; a variável pressão atmosférica apresenta um resultados fora do aceitável para todos os índices estatísticos, podendo interpretar-se que os valores ERA5 não são aceitáveis para utilização como substituto dos erros de medição; a variável precipitação apresenta um resultado bastante positivo relativamente ao intervalo de valores aceitáveis para o índice estatístico R^2 e apresenta um resultado ótimo para o índice RN_RMSE e MBE; a variável velocidade do vento apresenta um mau resultado quanto ao valor do R^2 e um resultado bom resultado para RN_RMSE porém o valor MBE indica uma sobrestimação ligeira dos valores simulados sobre os medidos, poderá ser considerado aceitável a utilização dos valores ERA5 para esta variável climática; a variável direção do vento apresenta resultados não aceitáveis para todos os índices estatísticos; a variável radiação global apresenta resultados ótimos quantos aos valores dos índices de exatidão estatística. Na localização de Portalegre, os resultados dos índices estatísticos para a variável temperatura são ótimos para R^2 , RN_RMSE e MBE sendo aceitável a utilização dos valores simulados ERA5 para substituírem os erros de medição *in situ*; para a variável humidade relativa, o resultado do índice R^2 está ligeiramente abaixo do aceitável contudo, o resultado para o índice RN_RMSE é um bom resultado e o valor de MBE indica que os valores ERA5 e medidos são coerentes entre si, torna assim os valores ERA5 aceitáveis para a variável humidade relativa; a variável pressão atmosférica apresenta um resultado fora do aceitável para todos os índices estatísticos, podendo interpretar-se que os valores ERA5 não são aceitáveis para utilização como substituto dos erros de medição; a variável precipitação apresenta um resultado bastante negativo relativamente ao intervalo de valores aceitáveis para o índice estatístico R^2 mas apresenta um resultado ótimo para o índice RN_RMSE contudo o valor de MBE indica que existe ligeira subestimação dos valores ERA5 sobre os medidos, tornando aceitável a utilização dos valores simulados para esta variável, com cautela; a variável velocidade do vento apresenta um mau resultado quanto ao valor do R^2 e um resultado bom para RN_RMSE e MBE indicando uma ligeira subestimação dos valores ERA5 relativamente aos medidos; a variável direção do vento apresenta resultados não aceitáveis para todos os índices estatísticos; a variável radiação global apresenta resultados ótimos para os índices estatísticos, tornando aceitável a utilização dos valores ERA5 para esta variável climática.

Tabela 3.11 - Cálculo dos índices de exatidão entre os valores registados *in situ* e os valores simulados, para cada variável climática. Região de Lisboa e Alto Alentejo de Portugal continental

Região de Lisboa, Alto Alentejo de Portugal continental									
Variáveis climáticas	Lisboa			Santarém			Portalegre		
	R^2	RN_RMSE	MBE	R^2	RN_RMSE	MBE	R^2	RN_RMSE	MBE
Temperatura	0,92	3%	0,0334	0,96	2%	0,0196	0,89	5%	-0,0098
Humidade relativa	0,58	11%	-0,0596	0,84	8%	0,0384	0,56	16%	-0,0274
Pressão atmosférica	0,07	9%	0,0055	0,04	28%	0,0125	0,01	89%	0,0545
Precipitação	0,04	1%	0,4063	0,82	2%	0,0159	0,02	2%	0,4889
Velocidade do vento	0,18	17%	-0,2482	0,23	11%	-0,2812	0,46	12%	0,2746
Direção do vento	0,59	39%	0,0685	0,31	25%	-0,0436	0,01	29%	0,0793
Radiação global	0,87	9%	-0,1256	0,93	6%	-0,0251	0,93	6%	-0,0196

Na Tabela 3.12 estão apresentados os resultados dos cálculos dos índices estatísticos *Coefficient of determination* (R^2), *Range Normalized Root Mean Square Error* (RN_RMSE) e *Mean Bias Error* (MBE) para três cidades representativas do clima na região de Lisboa e Alto Alentejo de Portugal continental, Sines, Beja e Faro. Na localização de Sines pode observar-se um resultado ótimo, tanto para R^2 como para RN_RMSE e MBE para a variável climática temperatura, interpretando-se que os valores medidos e ERA5 são coerentes entre si, sendo assim aceitável a utilização dos valores simulados ERA5 para a temperatura como substitutos dos erros de medição *in situ*; para a variável climática humidade relativa, apresentam um resultado ligeiramente abaixo do limite do aceitável para o índice R^2 e um bom resultado para o índice RN_RMSE e MBE, podendo-se concluir que os valores simulados para a humidade relativa poderão ser utilizados para substituírem os erros de medição; a variável climática pressão atmosférica falha no teste de exatidão para o índice estatístico R^2 apresentando um mau resultado, mas para o índice RN_RMSE encontra-se dentro do intervalo de valor aceitável e um valor de MBE que indica coerência entre os valores simulados e medidos, podendo assim ser utilizado os valores ERA5 como substitutos dos erros de medição; a variável precipitação apresenta um valor pouco favorável quanto ao índice de exatidão estatística, sendo muito baixo para R^2 mas o valor do índice RN_RMSE apresenta-se ótimo e o valor de MBE indica que há coerência entre os valores simulados e medidos; a variável velocidade do vento apresenta um valor negativo quanto à validação relativamente ao índice R^2 e um valor bom para o índice RN_RMSE, contudo o valor de MBE indica uma ligeira sobrestimação dos valores ERA5 sobre os medidos mas com base nos dois resultados poderá considerar-se aceitável os valores simulados para a esta variável climática; a variável climática direção do vento apresenta um resultado negativo para o índice R^2 e RN_RMSE; a variável radiação global apresenta resultados ótimos quanto aos valores dos índices de exatidão estatística, sendo aceitável a utilização dos valores simulados ERA5. Na localização de Beja, os resultados dos índices estatísticos para a variável temperatura são ótimos para R^2 , RN_RMSE e MBE sendo aceitável a utilização dos valores simulados ERA5 para substituírem os erros de medição *in situ*; para a variável humidade relativa, o resultado do índice R^2 e RN_RMSE é um ótimo resultado e o valor de MBE indica que os valores ERA5 e medidos são coerentes entre si, torna assim os valores ERA5 aceitáveis para a variável humidade relativa; a variável pressão atmosférica apresenta um resultado fora do aceitável para todos os índices estatísticos, podendo interpretar-se que os valores ERA5 não são aceitáveis para utilização como substituto dos erros de medição; a variável precipitação apresenta um resultado bastante negativo relativamente ao intervalo de valores aceitáveis para o índice estatístico R^2 e apresenta um resultado ótimo para o índice RN_RMSE, o resultado BEM indica uma ligeira subestimação dos valores simulados sobre os medidos, querendo dizer que os valores simulados apresentam-se menores que os valores medidos para esta variável climática; a variável velocidade do um resultado fora do aceitável para todos os índices estatísticos; a variável direção do vento apresenta resultados não aceitáveis para todos os índices estatísticos; a variável radiação global apresenta resultados ótimos quantos aos valores dos índices de exatidão estatística. Na localização de Faro, os resultados dos índices estatísticos para a variável temperatura são ótimos para R^2 , RN_RMSE e MBE sendo aceitável a utilização dos valores simulados ERA5 para substituírem os erros de medição *in situ*; para a variável humidade relativa, o resultado do índice R^2 está ligeiramente abaixo do aceitável contudo, o resultado para o índice RN_RMSE é um bom resultado e o valor de MBE indica que os valores ERA5 e medidos são coerentes entre si, torna assim os valores ERA5 aceitáveis para a variável humidade relativa; a variável pressão atmosférica apresenta um resultado aceitável para o índice R^2 e um resultado ótimo para o RN_RMSE e MBE, podendo interpretar-se que os valores ERA5 são aceitáveis para utilização como substituto dos erros de medição; a variável precipitação apresenta um resultado bastante negativo relativamente ao intervalo de valores aceitáveis para o índice estatístico R^2 mas apresenta um resultado ótimo para os índices RN_RMSE e MBE, tornando aceitável a utilização dos valores simulados para esta variável; a variável velocidade do vento apresenta um mau resultado quanto ao valor do R^2 e um resultado bom para RN_RMSE e MBE; a variável direção do vento apresenta resultados não aceitáveis para todos os índices estatísticos; a variável radiação global apresenta resultados ótimos para os índices estatísticos, tornando aceitável a utilização dos valores ERA5 para esta variável climática.

Tabela 3.12 - Cálculo dos índices de exatidão entre os valores registados *in situ* e os valores simulados, para cada variável climática. Região Sul de Portugal continental

Região de Lisboa, Sul de Portugal continental									
Variáveis climáticas	Sines			Beja			Faro		
	R ²	RN_RMSE	MBE	R ²	RN_RMSE	MBE	R ²	RN_RMSE	MBE
Temperatura	0,90	4%	-	0,96	3%	-0,0116	0,93	3%	-0,0119
Humidade relativa	0,61	11%	0,0551	0,81	11%	0,0754	0,65	10%	-0,0031
Pressão atmosférica	0,11	9%	0,0052	0,32	55%	0,0333	0,70	5%	0,0025
Precipitação	0,59	2%	-	0,23	2%	0,187	0,02	2%	-0,0078
Velocidade do vento	0,05	8%	0,0331	0,21	7%	0,2344	0,14	11%	0,0756
Direção do vento	0,05	31%	0,0034	0,41	23%	0,0274	0,09	31%	-0,0499
Radiação global	0,95	6%	0,0125	0,94	6%	0,0231	0,95	6%	0,0382

Desde a Figura 3.5 à Figura 3.11 está demonstrado a proporção de variáveis climáticas que apresentaram resultados aceitáveis ou não aceitáveis relativamente a todas as dezassete localizações analisadas. Como se pode observar, as variáveis climáticas de temperatura e radiação global apresentaram resultados favoráveis relativamente aos índices de exatidão estatística para os valores ERA5, a variável humidade relativa é apresentou resultados aceitáveis para 95% das localizações analisadas. As variáveis cujos resultados tiveram maior incidência de insatisfação foram a variável climática pressão atmosférica que apenas validou para 29,41% das localizações, a variável precipitação que validou para 17,65%, a velocidade do vento validou para 23,54% das localizações e a variável direção do vento obteve resultados insatisfatórios para todas as localizações analisadas.

Sobre as comparações recorrendo à execução de índices estatísticos, para a variável de temperatura os resultados apresentados são ótimos, sendo uma assunção transversal a todas as localizações selecionadas. Para a variável de humidade relativa, analisando e ponderando acerca de todos os resultados obtidos pelos três índices escolhidos para a avaliação, obteve-se no geral resultados satisfatórios para todas as localizações. Para a variável climática de pressão atmosférica obtiveram-se resultados maioritariamente pouco satisfatórios com exceção de localizações como Faro e Aveiro cujo desempenho foi positivo, em Sines o índice R² apresenta um resultado pouco satisfatório, contudo os resultados dos índices RN_RMSE e MBE são satisfatórios, o que levou a afirmar a variável climática como satisfatória, em Lisboa a situação repete-se, assumindo-se como satisfatório. A variável climática de precipitação apresenta resultados pouco satisfatórios para a maioria das localizações analisadas como demonstra a Figura 3.7. A variável velocidade do vento apresenta valores pouco satisfatórios para a maioria das localizações como demonstra a Figura 3.9 à exceção de localizações como Évora e Faro. Analisando a variável climática de direção do vento apresenta resultados poucos satisfatórios

todas as localizações tal como se verifica na Figura 3.10. Por fim, em relação à variável climática de radiação global apresenta na totalidade das localizações apresentadas, resultados ótimos para os valores simulados ERA5.

É possível concluir que os resultados dos índices estatísticos são coerentes com os gráficos apresentados, podendo assim assumir-se com segurança a validação dos dados climáticos para criação do ficheiro climático a utilizar na análise no presente caso de estudo, e que na generalidade as variáveis climáticas de temperatura, humidade relativa e radiação global provenientes do ERA5 têm um resultado ótimo podendo ser utilizadas com segurança, a variável climática de pressão atmosférica para certas localizações pode ser utilizada com segurança mas para outras localizações é necessário ter cautela na interpretação dos resultados sobre estudos a serem realizados, as variáveis climáticas como precipitação, velocidade e direção do vento apresentam para a generalidade das localizações resultados pouco satisfatórios sobre os valores ERA5 podendo-se concluir que há uma discrepância entre estes valores simulados e os valores medidos *in situ*.

Arndt et al. [32] sobre a sensibilidade de variáveis climáticas constatou que ocorriam divergências significativas nas variáveis da velocidade do vento e pressão atmosférica quando comparando dados medidos com ERA5, concluindo que é necessário um formato com maior resolução para estas variáveis. É expectável este tipo de variáveis climáticas falharem na validação na maior parte dos dados provenientes de *reanalysis* como é o caso do ERA5 tal como referido por Bujak et al [33].

Num estudo sobre a viabilidade de dados provenientes do ERA5 Zhang et al. constatou que as variações nos índices estatísticos sobre a variável climática de pressão atmosférica, quando comparando dados simulados com medidos, deve-se ao facto de o ERA5 usar interpolações no processo de assimilação dos dados climáticos

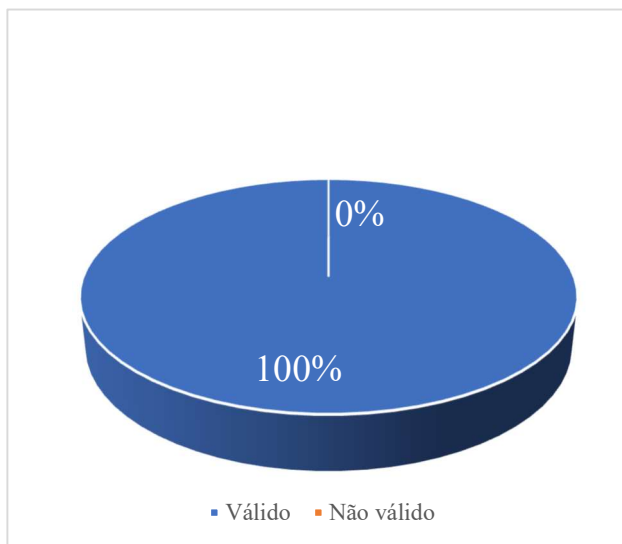


Figura 3.5 - Validação dos valores ERA5 relativamente às localizações analisadas, para a temperatura.

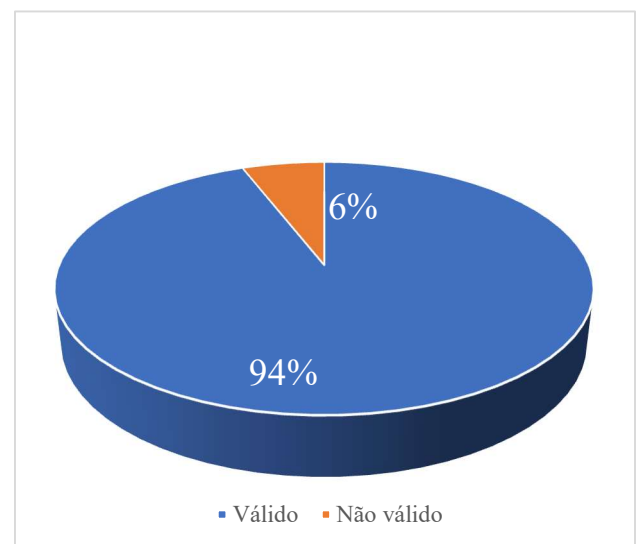


Figura 3.6 - Validação dos valores ERA5 relativamente às localizações analisadas, para a humidade relativa.

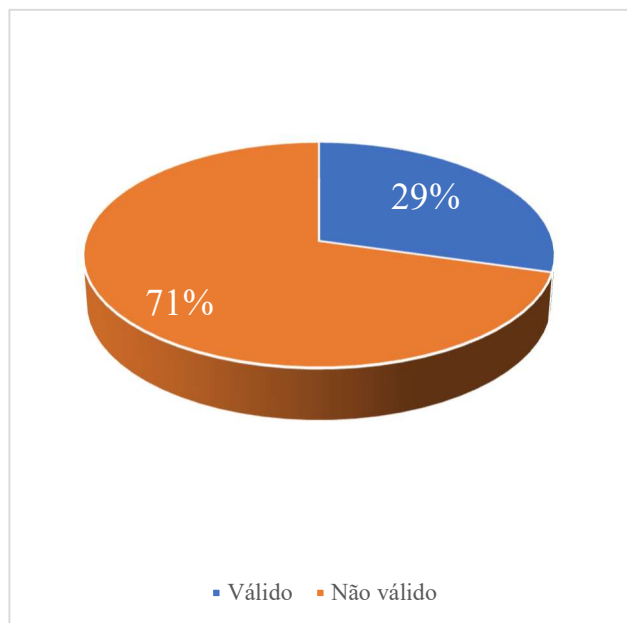


Figura 3.8 - Validação dos valores ERA5 relativamente às localizações analisadas para a pressão atmosférica.

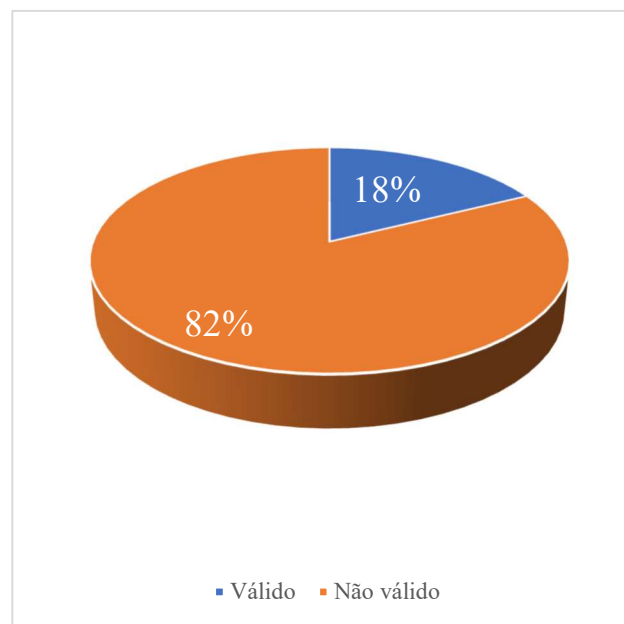


Figura 3.7 - Validação dos valores ERA5 relativamente às localizações analisadas para a precipitação.

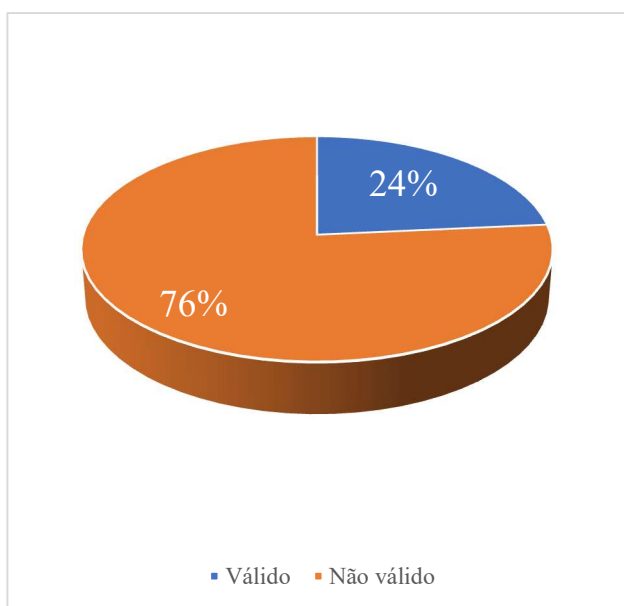


Figura 3.9 - Validação dos valores ERA5 relativamente às localizações analisadas para a velocidade do vento.

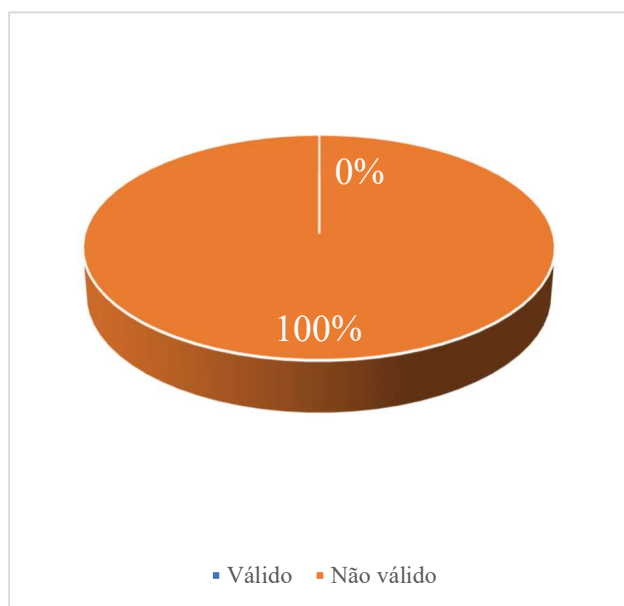


Figura 3.10 - Validação dos valores ERA5 relativamente às localizações analisadas para a direção do vento.

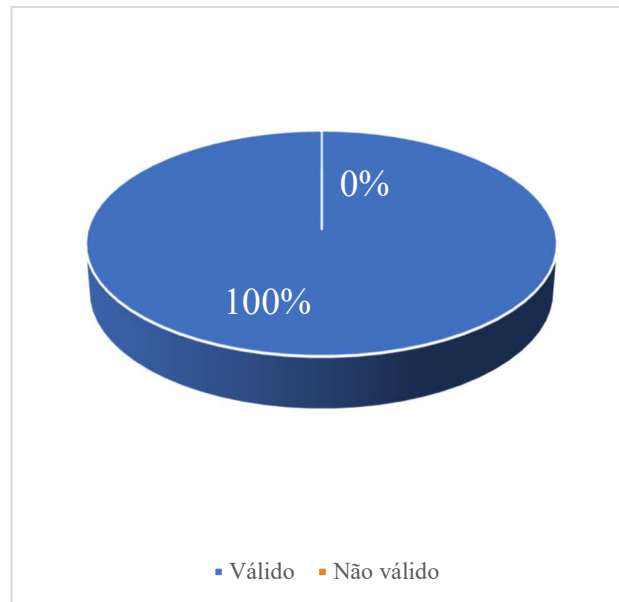


Figura 3.11 - Validação dos valores ERA5 relativamente às localidades analisadas para a radiação global.

Relativamente às variáveis climáticas cujos índices estatísticos e gráficos de linhas indicam que os valores simulados ERA5 são muito distantes dos valores medidos pelo Instituto do Mar e da Atmosfera (IPMA). Choidis et al. [34] fez comparações visuais para temperatura e humidade relativa entre o ficheiro climático ERA5 com nove anos de dados e dados capturados numa estação meteorológica. Detetaram que para variáveis como a precipitação o ficheiro climático ERA5 apresentava valores significativamente distantes dos medidos em campo, tendo como causa provável o espaço temporal em análise de nove anos ser reduzido para ter uma verdadeira avaliação da exatidão dos dados. O mesmo pode ser verificado na presente dissertação pois, o espaço temporal usado para análise é de oito anos de dados climáticos horários.

Outra justificação para a os resultados dos índices indicarem fraca exatidão entre os valores dos dados disponibilizados, simulados do ERA5 e os valores medidos pelo IPMA poderá ser devido ao facto de, mesmo se tratando de dados relativos à mesma cidade, a estação meteorológica pode encontrar-se numa coordenada diferente da coordenada usada para a transferência dos valores climáticos através da base de dados do ERA5 [35].

Arndt et al. [32] sobre a sensibilidade de variáveis climáticas constatou que ocorriam divergências significativas nas variáveis da velocidade do vento e pressão atmosférica quando comparando dados medidos com ERA5, concluindo que é necessário um formato com maior resolução para estas variáveis. É expectável este tipo de variáveis climáticas falharem na validação na maior parte dos dados provenientes de *reanalysis* como é o caso do ERA5 tal como referido por Bujak et al [33].

Num estudo sobre a viabilidade de dados provenientes do ERA5 Zhang et al. constatou que as variações nos índices estatísticos sobre a variável climática de pressão atmosférica, quando comparando dados simulados com medidos, deve-se ao facto de o ERA5 usar interpolações no processo de assimilação dos dados climáticos.

Xiaoqing et al. [36] também observou resultados bastante diferentes relativos à variável da precipitação. Comparando os valores ERA5 com medidos *in situ*, verificou que, em média, os valores recolhidos são duas vezes maiores que os medidos, sobrestimando-os, levando a valores não satisfatórios de índices estatísticos, no caso usaram-se três índices, *Coefficient of Correlation* (CC), *Relative Bias* (Rbias) e *Normal Root Mean Square Error* (RMSE). Observou-se que, comparando visualmente os gráficos de comparação entre valores ERA5 e valores medidos, a variabilidade era a mesma i.e a tendência para valores aumentarem e diminuírem ao longo do espaço temporal em análise é a mesma, sendo que quando é registado um aumento nos valores de precipitação do ERA5 também se regista um aumento de precipitação nos valores medidos, o mesmo acontece para quando há uma diminuição de precipitação nos valores registados. Este tipo de variabilidade também

pode ser observado nos gráficos demonstrados na presente dissertação como se observa na Figura 3.3 e na Figura 3.4. A possível causa para a fraca correlação entre registos de valores poderá dever-se ao facto de haver baixos índices de precipitação acumulada. Wu et al. sugeriu ainda que, quando comparados dados interpolados com registados *in situ* provoca um aumento no risco de ocorrência de maiores variações de performance estatística. Verificou ainda que, registos ERA5 têm melhor desempenho estatístico quando comparados com outros pontos em formatos de resolução *Grid* (como mencionado em 0, o ERA5 formata o globo numa resolução em grelhas que abrangem vários quilómetros da Terra), do que quando comparados com pontos específicos do globo, tais como, estações meteorológicas. Outros autores, tal como Chen et al. [37] sugerem que a possível causa poderá ser o impacto das estações do ano, quando comparam resultados medidos por satélite, e posteriormente simulados computacionalmente (caso do ERA5), e medidos em campo, verificaram uma variação significativa entre os dados registados e.g, em estações de invernos por serem estações que se relacionam com um maior aumento da precipitação, fazem com que se registem maiores valores e que quando comparando num todo há um conflito entre dados registados na estação de inverno com os registados nas restantes estações, influenciando os resultados obtidos pelos índices estatísticos.

Quanto ao fraco desempenho estatístico da variável da velocidade e direção do vento, poderá estar relacionado com o facto de o ERA5 não reproduzir as condições orográficas do local, ou seja, o relevo do terreno não está representado nos dados ERA5, provocando uma variação relativamente aos valores simulados e medidos, por exemplo, subestimando na maioria das validações quando se trata de zonas montanhosas e sobrestimando em zonas florestais [38],[39].

3.2. Resolução de erros de medição

Os erros traduzem-se em falhas no espaço temporal horário dos dados climáticos recolhidos na base de dados do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). Para se poder criar um ficheiro climático é necessário a obtenção de variáveis climáticas, geralmente registadas horariamente, obtidas a partir de fontes que disponibilizem valores aproximados da realidade. O melhor caso são ficheiros climáticos criados apenas com dados captados *in situ*. Contudo, tal como demonstrado no subcapítulo anterior, os dados captados *in situ* contêm falhas que necessitam de ser colmatadas por novos valores. Valores estes que foram validados como demonstrado no subcapítulo anterior e que ocuparam os espaços onde se localizavam as falhas.

Aplicou-se o seguinte método no tratamento dos dados climáticos medidos *in situ*, com recurso ao *software* Python, tal como efetuado por Coelho et.al [40]: 1) criou-se um código que fez com que, para erros horários menores ou iguais a uma ocorrência de três horas de falhas consecutivas fosse realizado uma interpolação linear para substituir as falhas que se encontravam nesses intervalos de tempo, e 2) para erros maiores que três horas consecutivas de falhas realizar-se-ia *spline* cúbico. Contudo, tal como demonstrado na Figura 3.13, existem variáveis climáticas cujas medições apresentam falhas consecutivas em intervalos que chegam a ser equivalentes a vários anos de falhas consecutivas. Para estes casos cujas interpolações não resultarem em valores precisos no tratamento dos dados, a substituição total das falhas por valores simulados ERA5 foi efetuada. As figuras que se seguem apresentam os resultados das resoluções das falhas.

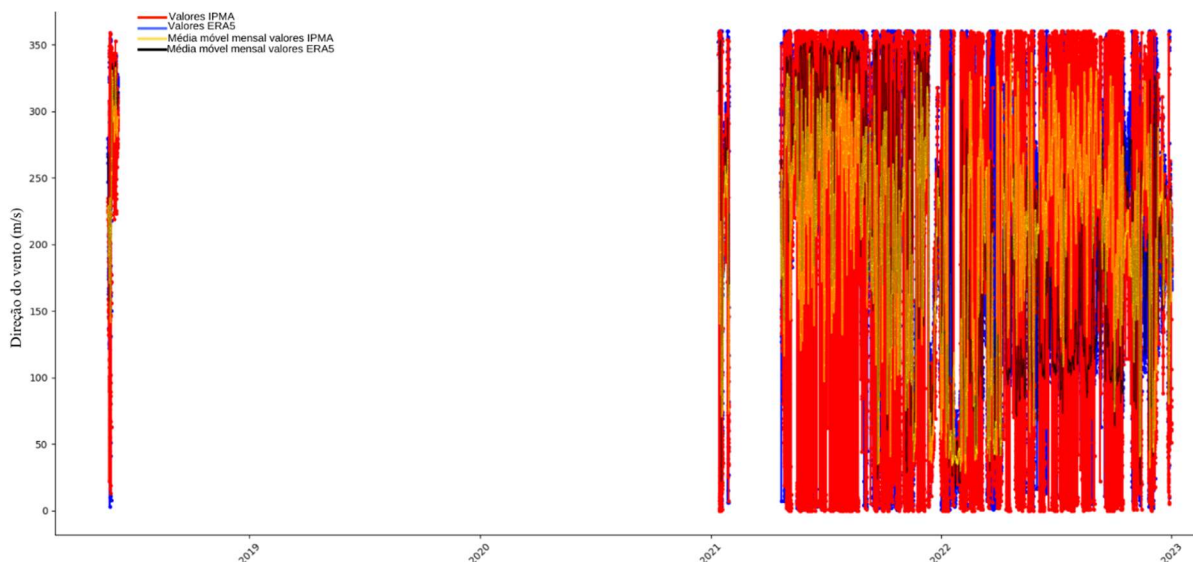


Figura 3.12 - Correção dos erros de medição *in situ* para a variável climática de temperatura (°C), para Lisboa.

A Figura 3.12 apresenta o resultado após a correção dos erros de medição, através de interpolações e/ou substituições pelos valores simulados ERA5 para a localização de Lisboa. Como se pode observar, visualmente os valores são semelhantes ao apresentado na Figura 3.3, mantendo a tendência para os valores diminuírem e aumentarem, ou seja, a sua variabilidade.

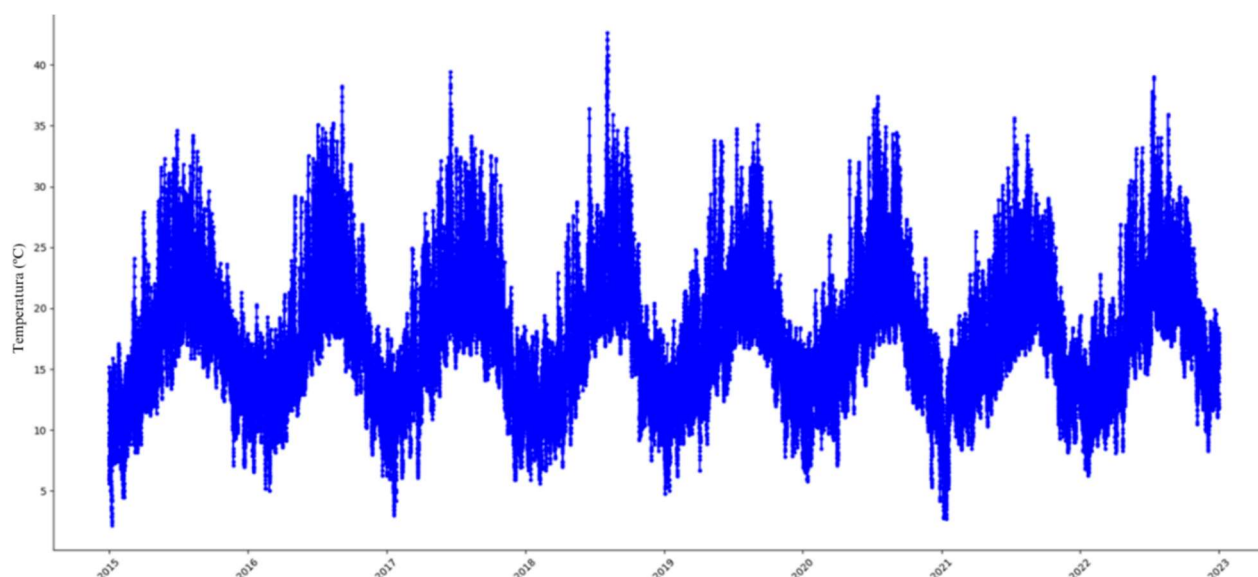


Figura 3.13 - Sobreposição de gráficos de linhas dos valores horários medidos (IPMA) e simulados (ERA5) para a localização de Lisboa, variável climática de direção do vento (°).

Na Tabela 3.13 pode observar-se que para a variável temperatura, na localização de Lisboa os valores medidos e simulados não diferem do produto final da correção dos erros de medição, poderá observar que os novos dados contemplam a mesma média relativo aos oito anos de dados que a média dos valores IPMA, a mesma mediana e o mesmo máximo e mínimo.

Tabela 3.13 – Cálculo da média, mediana, máximo e mínimo para os oito anos de valores para a variável climática temperatura, relativamente aos valores IPMA, ERA5 e corrigidos IPMA+ERA5 para Lisboa.

	Temperatura (°C)			
	Mínimo	Média	Mediana	Máximo
IPMA	2,2	17,4	16,9	42,6
ERA5	2,2	16,9	16,5	39,2
IPMA + ERA5	2,2	17,4	16,9	42,6

Consegue-se perceber a partir da Tabela 3.14 que existe uma harmonia entre os valores medidos e simulados para cada ano analisado, quando comparados com os valores corrigidos IPMA+ERA5, podendo observar-se que os valores são mais aproximados aos valores medidos do que aos simulados, o que aumenta o nível de exatidão dos dados quanto à sua representatividade da realidade, sobre o clima em Lisboa.

Tabela 3.14 – Comparação entre valores IPMA, ERA5 e IPMA+ERA5 para cada ano de dados horários analisado para Lisboa.

Anos	Temperatura IPMA (°C)			
	Mínimo	Média	Mediana	Máximo
2015	2,2	17,2	17,1	34,2
2016	5,0	17,3	16,3	38,2
2017	3,0	17,7	17,5	39,4
2018	5,6	17,1	16,2	42,6
2019	4,8	17,4	16,9	35,1
2020	5,8	17,6	16,9	37,4
2021	2,7	17,2	16,8	35,6
2022	6,3	17,9	17,6	39,0
Anos	Temperatura ERA5 (°C)			
	Mínimo	Média	Mediana	Máximo
2015	4,5	16,8	16,8	33,4
2016	6,4	16,9	16,1	37,1
2017	3,0	17,1	16,9	34,9
2018	4,5	16,4	15,5	39,2
2019	4,3	16,7	16,5	33,0
2020	5,0	17,0	16,5	32,6
2021	2,2	16,6	16,3	33,9
2022	7,0	17,4	17,2	35,4
Anos	Temperatura IPMA + ERA5 (°C)			
	Mínimo	Média	Mediana	Máximo
2015	2,2	17,2	17,1	34,6
2016	5,0	17,3	16,3	38,2
2017	3,0	17,7	17,5	39,4
2018	5,6	17,1	16,2	42,6
2019	4,8	17,4	16,9	35,1
2020	4,2	17,7	16,9	37,4
2021	2,7	17,2	16,8	35,6
2022	6,3	17,9	17,6	39,0

Para detalhar as comparações entre os valores medidos e simulados com os valores corrigidos na Tabela 3.15 uma comparação sobre temperatura média foi efetuada para cada estação do ano relativo a todos os anos analisados. É possível verificar a aproximação aos valores medidos IPMA por parte dos valores corrigidos mantem-se, concluindo-se que a correção é coerente com o que se poderá observar na realidade em Lisboa. Esta maior exatidão deverá também ao facto de terem sido registados poucos erros de medição, cerca de 0,2% (como demonstrado na Tabela 3.3), o que levou a serem efetuadas poucas interpolações e substituições diretas pelos valores medidos ERA5.

Tabela 3.15 - Comparação entre valores IPMA, ERA5 e IPMA+ERA5 para cada ano de dados horários analisado e respetivas estações climáticas para Lisboa.

	Estações climáticas	Temperatura média (°C)							
		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
IPMA	Inverno	11,6	12,8	12,7	12,2	13,4	13,7	12,8	13,2
	Primavera	19,3	17,6	20,0	17,5	18,3	18,4	17,9	18,7
	Verão	21,7	23,5	22,0	23,4	22,1	23,2	21,9	22,9
	Outono	15,9	15,2	16,0	15,4	15,6	15,1	15,9	16,9
ERA5	Inverno	11,6	12,7	12,5	11,8	12,7	13,2	12,8	13,1
	Primavera	18,5	16,8	19,0	16,3	17,4	17,6	17,1	17,7
	Verão	21,2	22,7	21,2	22,1	21,3	21,9	20,8	21,7
	Outono	16,1	15,4	15,8	15,3	15,5	15,3	15,9	16,8
IPMA + ERA5	Inverno	11,9	12,8	12,7	12,2	13,4	13,7	12,9	13,2
	Primavera	19,4	17,6	20,0	17,5	18,3	18,5	17,9	18,7
	Verão	21,7	23,6	22,0	23,4	22,1	23,2	21,9	22,9
	Outono	15,9	15,2	16,1	15,4	15,6	15,1	15,9	16,9

Na Figura 3.14 é apresentado um gráfico de linhas que demonstra a correção efetuada com base nos dados simulados e medidos. Poderá observar-se algumas variações de valores ao longo dos anos, devido à substituição de dados e interpolação linear aplicada na correção dos erros.

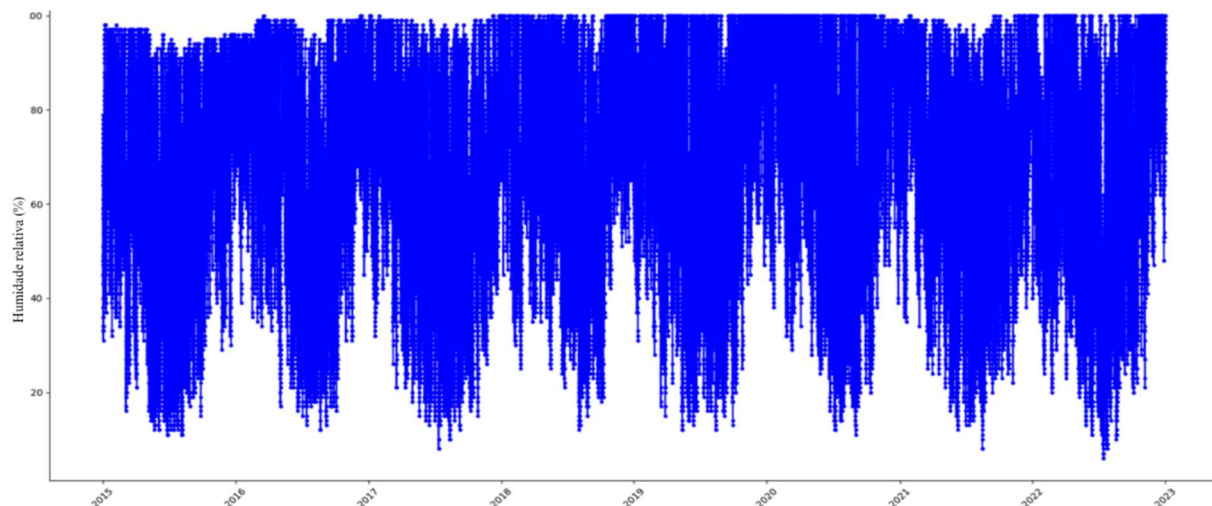


Figura 3.14 - Correção dos erros de medição *in situ* para a variável climática de humidade relativa (%), localização de Beja.

A Tabela 3.16 apresenta os cálculos de média e mediana para todos os anos analisados de valores medidos e simulados, comparando-os com os valores corrigidos através de interpolações lineares e/ou substituição direta dos erros de medição por dados simulados, para a localização de Beja, variável climática de humidade relativa. Para a totalidade dos dados horários correspondentes aos oito anos analisados, os valores

corrigidos apresentam uma média de 5% inferior à média dos valores medidos e apresenta uma média e mediana igual aos valores simulados ERA5, contudo, as diferenças entre os valores corrigidos e medidos são mínimas o que confere coerência aos novos valores.

Tabela 3.16 - Cálculo da média, mediana, máximo e mínimo para os oito anos de valores para a variável climática humidade relativa, relativamente aos valores IPMA, ERA5 e corrigidos IPMA+ERA5 para Beja.

Humidade relativa (%)		
Dados climáticos	Média	Mediana
IPMA	69,0	73,0
ERA5	69,0	73,0
IPMA + ERA5	69,0	73,0

Na Tabela 3.17 uma comparação entre os valores horários foi efetuada com o cálculo da média e mediana para os dados de cada ano analisado. Poderá observar-se que os valores corrigidos têm os valores de média e mediana iguais aos valores medidos IPMA, apresentando as mesmas diferenças que estes para os valores de média e mediana para os anos de valores ERA5.

Tabela 3.17– Comparação entre valores IPMA, ERA5 e IPMA+ERA5 para cada ano de dados horários analisado para Beja.

Anos	Humidade relativa IPMA (%)		Humidade relativa ERA5 (%)		Humidade relativa IPMA + ERA5 (%)	
	Media	Mediana	Media	Mediana	Media	Mediana
2015	64,4	68,0	64,1	66,0	64,4	68,0
2016	69,2	74,0	64,9	67,0	69,2	74,0
2017	63,5	65,0	58,7	59,0	63,5	65,0
2018	73,5	79,0	67,3	70,0	73,5	79,0
2019	71,1	75,0	62,8	65,0	71,1	75,0
2020	74,4	81,0	66,4	69,0	74,4	81,0
2021	68,4	72,0	64,9	67,0	68,4	72,0
2022	67,6	71,0	64,1	66,0	67,4	71,0

Na Tabela 3.18 poderá observar-se ao detalhe pelas estações climáticas dos anos em análise que as igualdades entre os valores IPMA e os valores corrigidos se mantêm. Podendo concluir-se que devido à baixa percentagem de erros de medição encontrados para os valores IPMA as interpolações lineares e substituições que ocorreram foram mínimas, mantendo a maioria dos dados medidos inalterados, representando assim com exatidão o clima registado em Beja.

Tabela 3.18 - Comparação entre valores IPMA, ERA5 e IPMA+ERA5 para cada ano de dados horários analisado e respetivas estações climáticas para Beja.

	Estações climáticas	Humidade relativa média (%)							
		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
IPMA	Inverno	72,5	80,0	77,5	78,9	74,0	84,0	78,0	71,5
	Primavera	56,4	68,6	58,9	74,7	65,3	75,6	65,0	61,4
	Verão	53,7	50,9	52,3	58,4	60,8	58,2	58,2	57,7
	Outono	75,0	56,4	65,7	82,2	84,4	80,1	72,5	79,5
ERA5	Inverno	71,5	75,7	73,9	73,7	68,8	74,5	75,3	69,6
	Primavera	54,7	63,2	52,8	68,5	55,4	65,3	60,4	56,6
	Verão	53,4	46,6	46,4	52,4	52,4	50,5	53,9	53,6
	Outono	77,1	74,1	62,1	74,6	74,7	75,5	70,1	76,9
IPMA + ERA5	Inverno	72,5	80,0	77,5	78,9	74,0	84,0	78,1	71,5
	Primavera	56,4	68,6	58,9	74,7	65,3	75,6	65,0	61,3
	Verão	53,7	50,9	52,3	58,4	60,8	58,2	58,2	57,3
	Outono	75,0	77,8	65,7	82,2	84,4	80,0	72,5	79,5

Na Figura 3.15 e na Tabela 3.19 estão apresentados os resultados relativos aos valores corrigidos para a localização que mais erros continha para a variável temperatura, como se pode observar na Tabela 3.3 os erros abrangem 9,4% dos dados horários registados. Constata-se que a correção não modificou em demasia os valores medidos *in situ* aproximando-se mais dos valores medidos do que os valores simulados, nos valores de média, mediana, máximo e mínimo.

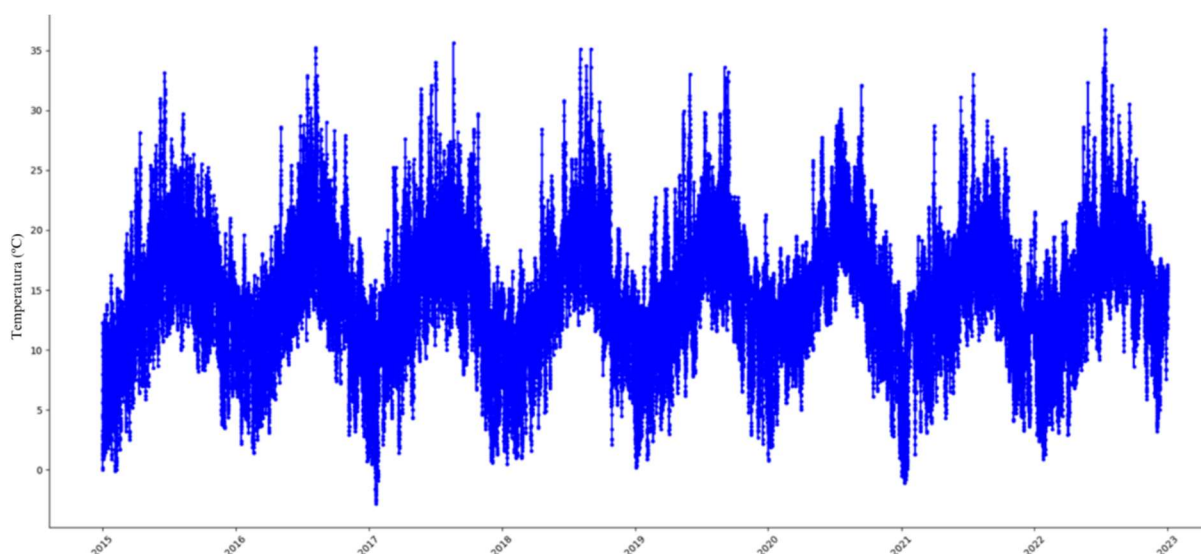


Figura 3.15 - Correção dos erros de medição *in situ* para a variável climática de temperatura (°C), localização de Viana do Castelo.

Tabela 3.19 - Cálculo da média, mediana, máximo e mínimo para os oito anos de valores para a variável climática temperatura, relativamente aos valores IPMA, ERA5 e corrigidos IPMA+ERA5 para Viana do Castelo.

	Temperatura (°C)			
	Mínimo	Média	Mediana	Máximo
IPMA	14,4	14,4	14,4	36,7
ERA5	-0,7	15,1	14,9	33,5
IPMA + ERA5	-2,8	14,6	14,5	36,7

Na Tabela 3.20 constata-se que a maior diferença entre os valores de média de temperatura para os valores corrigido e medidos IPMA é no ano de 2020 diferindo apenas 2°C, aproximando-se os valores corrigidos dos valores ERA5, contudo as maiores diferenças entre valores máximos e mínimos encontra-se no ano de 2020 e 2016 entre os valores corrigidos e medidos ERA5, diferindo 2°C de máximo de temperatura e 1,7°C de mínimo em 2020, uma diferença de 3,2°C de temperatura máxima e 2,8°C para temperatura mínima em 2016. Todas as diferenças de temperatura estão dentro dos limites aceitáveis.

Tabela 3.20- Comparação entre valores IPMA, ERA5 e IPMA+ERA5 para cada ano de dados horários analisado para Viana do Castelo.

Temperatura IPMA (°C)				
Anos	Mínimo	Média	Mediana	Máximo
2015	-0,1	14,4	14,4	33,1
2016	0,7	14,3	14,6	35,2
2017	-2,8	14,3	14	35,6
2018	0,5	14,3	14,3	35,1
2019	0,2	14,7	14	33,6
2020	0,8	13,2	14,8	32,1
2021	-1,1	14,3	13,6	33
2022	0,9	15,1	14,4	36,7
Temperatura ERA5 (°C)				
Anos	Mínimo	Média	Mediana	Máximo
2015	0,7	15,1	15,2	29,2
2016	3,5	15,1	14,4	32,4
2017	-0,7	15,2	15,3	30,7
2018	2	15,0	14,2	32,9
2019	0,6	14,7	14,5	29,6
2020	2,5	15,4	14,9	30,1
2021	0,7	14,8	14,8	29,1
2022	2,1	15,7	15,6	33,5
Temperatura IPMA + ERA5 (°C)				
Anos	Mínimo	Média	Mediana	Máximo
2015	-0,1	14,4	14,6	33,1
2016	0,7	14,3	14,0	35,2
2017	-2,8	14,5	14,6	35,6
2018	0,5	14,4	14,0	35,1
2019	0,2	14,7	14,7	33,6
2020	0,8	15,2	14,9	32,1
2021	-1,1	14,3	14,4	33,0
2022	0,9	15,1	15,4	36,7

A Tabela 3.21 apresenta com maior detalhe as diferenças e igualdades de temperatura para todas as estações climáticas de cada ano analisado. Pode observar-se que em 2020 a diferença de valores é a maior comparando todos os anos devido ao facto de a maior incidência de erros de medição verificou-se na Primavera de 2020, pois a tabela apresentada não apresenta valores para essa estação do ano, querendo dizer que os dados inseridos nesse período foram valores simulados ERA5, observando-se e igualdade de médias de temperatura para a Primavera de 2020 entre os valores corrigidos e simulados ERA5. No Outono de 2016 observa-se a maior diferença de valores entre os valores medidos IPMA e corrigidos.

Tabela 3.21- Comparação entre valores IPMA, ERA5 e IPMA+ERA5 para cada ano de dados horários analisado e respetivas estações climáticas para Viana do Castelo.

	Estações climáticas	Temperatura média (°C)							
		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
IPMA	Inverno	9,3	10,6	10,3	9,5	10,3	9,2	10,6	10,7
	Primavera	16,5	15,0	16,6	14,9	15,4	-	15,3	15,7
	Verão	18,0	19,1	18,4	19,5	19,5	18,2	18,4	19,5
	Outono	13,9	16,5	11,4	13,2	13,4	12,7	12,8	14,3
ERA5	Inverno	9,8	10,9	10,9	10,0	10,7	11,5	11,1	11,1
	Primavera	16,9	15,1	17,1	15,4	15,1	16,2	15,7	16,0
	Verão	19,2	20,8	19,4	20,9	19,7	20,4	19,2	20,7
	Outono	14,4	13,3	13,4	13,6	13,2	13,2	13,5	14,7
IPMA + ERA5	Inverno	9,3	10,6	10,3	9,6	10,4	11,5	10,8	10,7
	Primavera	16,5	14,9	16,6	15,1	15,4	16,2	15,2	15,7
	Verão	18,0	19,1	18,4	19,5	19,5	20,2	18,4	19,5
	Outono	13,9	12,3	12,7	13,2	13,3	12,7	12,8	14,3

Tabela 3.22 são relativos à localização de Braga, local que obteve maiores erros de medição *in situ*, sendo cerca de 21,1% dos dados horários registados. Observa-se que as diferenças entre os valores corrigidos e os valores medidos são ligeiras para a média de humidade relativa de todos os anos analisados e para a mediana.

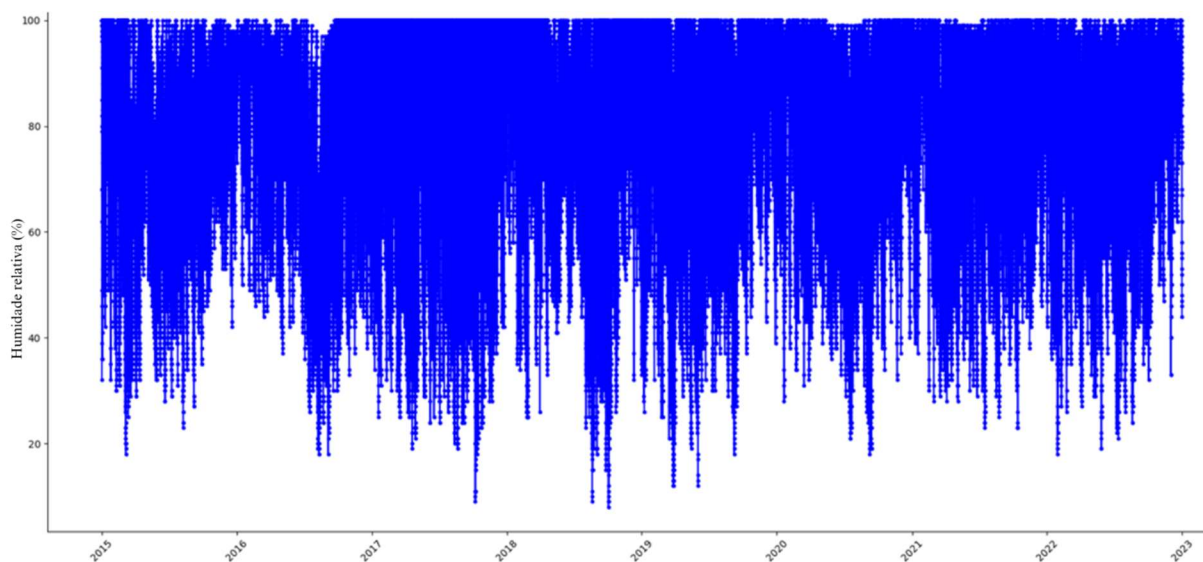


Figura 3.16 - Correção dos erros de medição *in situ* para a variável climática de Humidade relativa (%), localização de Braga.

Tabela 3.22 - Cálculo da média, mediana, máximo e mínimo para os oito anos de valores para a variável climática humidade relativa, relativamente aos valores IPMA, ERA5 e corrigidos IPMA+ERA5 para Braga.

Humidade relativa (%)		
Dados climáticos	Média	Mediana
IPMA	79,7	88,0
ERA5	78,3	83,0
IPMA + ERA5	79,2	86,0

A Tabela 3.23 apresenta resultados relativos à média de humidade relativa para cada de dados horários analisados correspondendo aos valores medidos IPMA, simulados ERA5 e corrigidos IPMA+ERA5. A maior diferença de valores de média de humidade relativa encontra-se no ano de 2017 entre os valores simulados e corrigidos, encontrando-se igualdades entre os valores corrigidos e medidos, querendo dizer que os valores corrigidos aproximam-se mais da realidade encontrada *in situ*, sendo assim representativo do clima de Braga.

Tabela 3.23 – Comparação entre valores IPMA, ERA5 e IPMA+ERA5 para cada ano de dados horários analisado para Braga.

Anos	Humidade relativa IPMA (%)		Humidade relativa ERA5 (%)		Humidade relativa IPMA + ERA5 (%)	
	Media	Mediana	Media	Mediana	Media	Mediana
2015	78,1	88,0	77,7	82,0	77,0	81,0
2016	80,3	84,0	78,0	84,0	78,6	85,0
2017	79,4	90,0	75,8	81,0	79,4	92,0
2018	81,8	92,0	78,9	84,0	81,3	89,0
2019	78,8	92,0	79,1	84,0	78,8	87,0
2020	79,9	87,0	79,4	85,0	79,9	87,0
2021	79,7	87,0	78,9	83,0	79,7	86,0
2022	79,1	86,0	78,8	84,0	79,1	85,0

É interessante analisar a Tabela 3.24 pois apresenta com maior detalhe as variações de humidade relativa para cada ano e respetivas estações do ano, observando-se em que altura do espaço cronológico incidiu o maior número de erros. Os meses correspondentes às estações de Primavera, Verão e Outono não contiveram qualquer tipo de medição horária registada devido a erros de medição e o ano de 2016 teve o mesmo acontecimento para as estações de Inverno, Outono e Primavera, querendo isto dizer que os valores corrigidos para essas estações do ano contiveram apenas dados simulados ERA5, porém esse fator não influenciou significativamente o resultado dos oito anos de valores horários corrigidos. Observa-se que a maior diferença de valores corrigidos se encontra entre o ano 2017 estação de Verão, havendo uma diferença de 30% que implicaria que os valores corrigidos ficassem fora do intervalo aceitável, contudo, o que interessa para o estudo é uma maior coesão com os valores que traduzem com maior exatidão o clima local, sendo então os valores medidos IPMA. Pode-se concluir que, apesar de Braga ser a localização com maior percentagem de falhas de medição, a utilização dos valores ERA5 para colmatar as falhas manteve os dados aproximados da realidade registada *in situ*.

Tabela 3.24 - Comparação entre valores IPMA, ERA5 e IPMA+ERA5 para cada ano de dados horários analisado e respectivas estações climáticas para Braga.

	Estações climáticas	Humidade relativa média (%)							
		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
IPMA	Inverno	78,1	-	82,2	87,8	77,8	83,6	82,4	78,4
	Primavera	-	-	74,0	87,5	73,5	78,5	75,2	75,0
	Verão	-	70,6	76,6	70,7	75,1	70,5	77,0	74,2
	Outono	-	-	84,8	83,1	88,7	87,2	84,5	88,6
ERA5	Inverno	71,5	75,7	73,9	73,7	68,8	74,5	75,3	69,6
	Primavera	54,7	63,2	52,8	68,5	55,4	65,3	60,4	56,6
	Verão	53,4	46,6	46,4	52,4	52,4	50,5	53,9	53,6
	Outono	77,1	74,1	62,1	74,6	74,7	75,5	70,1	76,9
IPMA + ERA5	Inverno	78,2	85,0	82,2	87,8	77,8	83,6	82,4	78,4
	Primavera	72,5	80,4	74,0	81,0	73,5	78,5	75,2	75,0
	Verão	73,2	64,5	76,6	73,6	75,0	70,4	76,9	74,2
	Outono	84,2	84,5	84,8	83,1	88,7	87,3	84,4	88,6

3.3. Ficheiro climático e modelo geométrico como *input* no WUFI Plus

3.3.1. MRY com recurso ao método *Moisture Index* (MI)

Este método foi criado por Cornick et.al [41] e referenciado por vários autores tais como Kim et.al [22] realizando uma revisão sobre métodos a utilizar para a criação de um ano de referência adequado para estudos higróticos. O *Moisture Index* é um método eficaz para representar o clima exterior de uma dada localização escolhida relativamente a níveis de humidade, relacionando dois fatores, o grau de humedecimento através de um índice denominado como *wetting Index* (WI) e o grau de secagem através da evaporação da água representado por um índice denominado como *drying index* (DI). O MI necessita apenas de três variáveis climáticas para ser calculado sendo estas, temperatura (°C), humidade relativa (%) e precipitação (mm).

O WI é adquirido com base no que está definido no projeto MEWS [42] através da obtenção da precipitação média anual.

O DI é adquirido através da obtenção da temperatura média anual e humidade relativa média anual, usando estes dois fatores para obter o limite de saturação de vapor de água (w_{sat}) e a concentração de vapor de água no ar (w_{out}). O *drying Index* (DI) é calculado com recurso à seguinte formula.

$$DI = \Delta w(T) = w_{sat}(T) - w_{out}(T) \quad 3.1$$

Cornick et.al [41] recomendou a utilização de medias anuais para situações em que o caso de estudo envolve várias localizações tal como é o caso da presente dissertação, contudo, o cálculo de médias anuais para a temperatura tende a subestimar o valor real do *drying index* devido ao facto de a pressão do vapor de água no ar não estar linearmente relacionado com o aumento ou diminuição da temperatura. Demonstrou que cerca de 21% do valor do *drying index* é subestimado e para solucionar esta subestimação foi necessário aplicar uma correção traduzindo-se num valor de temperatura equivalente (T_{eq}) que torna o valor do *drying index* no valor que se obteria se fosse calculado para cada hora dos anos em estudo. O método anual aplicando-se a correção é uma forma de economizar tempo e de tornar o processo de calculo do MI menos exigente em poderio computacional.

O cálculo da temperatura equivalente (T_{eq}) é efetuado com recurso à seguinte formula.

$$T_{correct} = 0.2206 \times AR - 0.9073 \quad 3.2$$

Onde AR, significa *Annual Range*, ou seja, a amplitude total dos dados climáticos, neste caso da temperatura (°C).

$$T_{eq} = T + T_{correct} \quad 3.3$$

Sendo T, a temperatura media anual (°C).

Após os cálculos do *Moisture Index* (MI) para cada ano do caso de estudo escolher-se-á como ano de referência MRY o ano com maior valor de MI.

A decisão do *Moisture Reference Year* (MRY) através da aplicação do MI, para as localizações selecionadas está representado nas tabelas abaixo, onde o ano de referência está sublinhado em cor verde. Foi selecionado o ano de referência com base no maior valor de MI.

A Tabela 3.25 apresenta os resultados dos cálculos para obter o *Moisture Index*. Efetuado para cada um dos oito anos analisados para a localização de Lisboa. O ano escolhido como *Moisture Reference Year* será o ano com maior índice MI, por isso, o ano 2022 foi o ano escolhido, revelando que é o ano com maior taxa de humidade em Lisboa. Contudo, é interessante observar que o ano de 2017 foi o mais húmido pois é o ano mais selecionado quanto ao MI.

Tabela 3.25- Cálculo e resultado do *Moisture Index* (MI) para a localização de Lisboa.

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Temperatura (°C)	17,2	17,3	17,7	17,1	17,4	17,6	17,2	17,9
Temperatura (Corrigido)	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Temperatura equivalente (°C)	19,5	19,5	19,9	19,3	19,6	19,9	19,4	20,1
Humidade Relativa (%)	69	70	70	71	70	74	69	69
Wsat	16,30	17,30	17,30	16,30	17,30	17,30	16,30	17,30
Wout	11,32	12,11	12,25	11,65	12,19	12,77	11,24	12,05
Precipitação (mm)	0,06	0,10	0,06	0,09	0,06	0,07	0,06	0,09
WI	0,06	0,10	0,06	0,09	0,06	0,07	0,06	0,09
DI	4,98	5,19	5,05	4,65	5,11	4,53	5,06	5,25
MI	3,98	4,19	4,05	3,66	4,11	3,53	4,06	4,25

A Tabela 3.26 apresenta os resultados de *Moisture Index* e os anos selecionados como MRY por obterem os maiores valores de MI relativamente aos oito anos analisados, para cada localização estudada.

Tabela 3.26– Localizações selecionadas com respetivos MI e ano declarado como referência, MRY.

Localizações	Moisture Index	MRY
Bragança	4,96	2017
Vila real	4,24	2017
Viana do Castelo	1,81	2017
Braga	2,54	2015
Guarda	4,62	2015
Viseu	4,24	2017
Aveiro	2,89	2015
Coimbra	3,83	2018
Castelo Branco	6,75	2017
Leiria	2,87	2017
Lisboa	4,25	2022
Santarém	4,32	2017
Sines	2,63	2015
Portalegre	4,89	2022
Évora	5,12	2017
Beja	5,68	2017
Faro	7,57	2017

3.3.2. Inserção do ficheiro MRY como *input* no WUFI Plus

Após a seleção dos anos de referência iniciou-se um processo de adaptação dos dados climáticos horários referentes a cada ano de referência selecionado para um formato de ficheiro válido para ser lido pelo *software* WUFI Plus. O WUFI Plus suporta variados formatos de ficheiros tais como, WET, TRY, DAT, IWC, WAC, WBC e KLI [43]. O ficheiro que será utilizado será em formato WAC (WUFI ASCII *climate format*) tal como recomendado no manual de instruções do WUFI [43] por ser um formato flexível para a utilização como ficheiro climático. O WUFI tem à disposição do utilizador, após a instalação no computador, um conversor de ficheiro em formato xslx em formato wac, o qual foi utilizado para proceder à conversão dos ficheiros climáticos a serem inseridos no programa.

3.3.3. Importação e inserção de um modelo geométrico no WUFI Plus

O *software* WUFI Plus disponibiliza três modos para inserção de um modelo geométrico. Pode-se recorrer a um sistema, incorporado no programa, para criação de um modelo geométrico simples denominado de *Building Wizard*, que se encontra na árvore de projeto, ou importando um modelo criado num *software* BIM. O programa permite receber como *input* modelos geométricos criados pelo *software* Sketchup no formato sketchup através de um *plugin* inserido no programa, ou em formato gbXML de um modelo geométrico desenhado no *software* Autodesk Revit.

Na presente dissertação optou-se por desenhar o modelo geométrico utilizando ferramentas como o *software* de modelação 3D, Autodesk Revit. O modelo que foi desenhado foi utilizado em outro estudo realizado por Baltazar et.al [44].

Quando finalizado o modelo 3D, foi necessário efetuar a exportação no formato de ficheiro especificado neste capítulo, em vez do formato corrente de exportação do modelo Revit, o formato rte (Revit Template). Pois, o formato gbXML é um formato em que o modelo 3D é adaptado para análise energética, dividindo-se

em áreas e volumes que delimitam os ambientes interiores, mantendo todas as características geométricas do modelo desenhado. Só após efetuada esta divisão é que poderá realizar a exportação do modelo energético 3D.

Efetuada a extração a partir do Revit, o ficheiro gbXML terá de ser inserido num conversor para WUFI Plus, que traduz o modelo energético do Revit para um modelo computacional WUFI Plus, mantendo todos os ambientes criados em Revit. Este conversor encontra-se numa pasta de nome “*tools*” que é automaticamente criada após instalação do WUFI Plus.

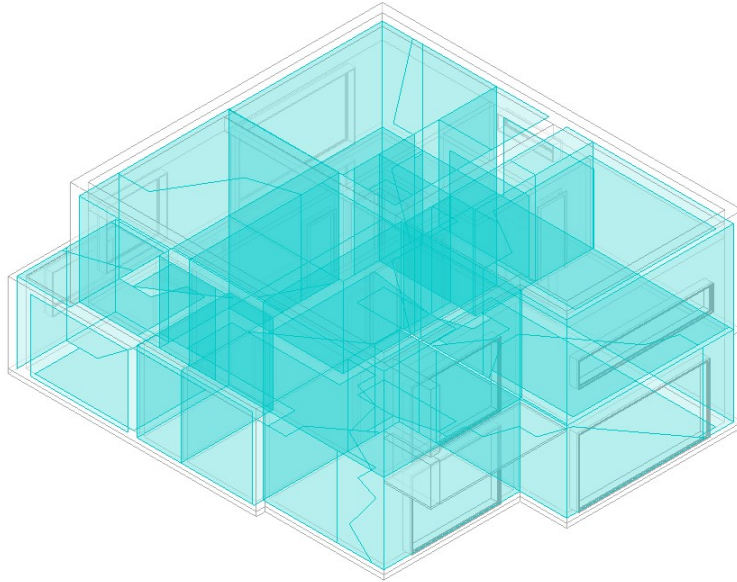


Figura 3.17 - Modelo energético 3D. Captado do programa Autodesk Revit.

No Anexo C será demonstrado uma metodologia por passos para realizar a transformação do modelo 3D desenhado em Autodesk Revit para o formato necessário para ser introduzido no programa WUFI Plus.

4 Soluções construtivas típicas de paredes envolventes exterior em Portugal

4.1. Breve caracterização do parque edificado em Portugal

A presente dissertação tem como objetivo abordar os comportamentos higrotérmicos de envolventes, cujas soluções construtivas para enchimento sejam de execução comum em Portugal. Para tal, uma breve caracterização do parque edificado português deve ser efetuada. Dado os séculos de existência do território português, um testemunho à história da arquitetura ao longo dos anos pode ser representado em Portugal, desde o Império Romano aos tempos modernos. Porém, como é destino de todas as tecnologias, tudo se transforma e o antigo entra em desuso, tornando-se história. Em Portugal existe uma predominância de edifícios habitados cujas soluções construtivas das envolventes são provenientes de edifícios cuja arquitetura contempla uma construção denominada de “tradicional”, tal são os casos dos edifícios de alvenaria pedra identificados como pré-Pombalinos referindo-se ao período anterior ao terramoto de 1755, edifícios de alvenaria Pombalina (desde 1755 a 1870) [45], edifícios de alvenaria de pedra e tijolo cerâmico do tipo Gaioleiro (desde 1880 a 1930), edifícios de alvenaria de pedra, tijolo e princípios da utilização de betão (desde 1930 a 1940), edifícios de alvenaria de tijolo e betão armado (desde 1940 a 1960) e, por fim a arquitetura moderna sendo, edifícios reticulados de betão armado preenchidos com alvenaria de tijolo, com variadas atualizações na tecnologia de execução até aos dias de hoje (desde 1960 à atualidade).

Segundo os censos de 2021, Portugal tem cerca de três milhões e seiscentos mil edifícios construídos. Podendo interpretar-se que: 1) os edifícios pré-pombalinos e pombalinos representam cerca de 4,9 % do parque habitacional, 2) gaioleiro e mistos cerca de 7,6 %, 3) alvenaria de tijolo e betão armado cerca de 10,3 %, e 4) reticulados de betão armado 77,2%. Concluindo-se assim que existe uma porção significativa de edifícios antigos no parque edificado de Portugal.

Será, por isso, no âmbito do caso de estudo da presente dissertação a necessidade de analisar paredes resistentes de alvenaria de pedra, parede simples de alvenaria cerâmica e parede dupla de alvenaria cerâmica, agrupando-se assim três das soluções construtivas que podem ser encontradas com forte probabilidade nas envolventes dos edifícios em Portugal.

4.2. Parede resistente de alvenaria de pedra

A solução construtiva de alvenaria de pedra enquadra-se no que é denominado por “construção tradicional” [46], por ser uma tecnologia previa à utilização massiva do betão armado. Em Portugal Continental é possível identificar uma heterogeneidade na arquitetura tradicional de Norte a Sul do país, pois a construção erigida nos locais está adaptada aos recursos próximos desses mesmos locais, contribuindo assim, como consequência, para uma heterogeneidade nas soluções construtivas que se observarão. A Norte do país pode-se observar a utilização de granito para erigir paredes de fachada aparelhada ou de pedra seca. A Sul do país o panorama geral, de construção tradicional, difere para paredes resistentes de alvenaria de adobe ou taipa, não se utilizando pedra. Ao centro do país existe um misto de tecnologias encontrando-se, maioritariamente no interior, edifícios de fachada em alvenaria de pedra ordinária com execução em blocos de pedra irregular e no litoral, encontram-se maioritariamente edifícios de fachada em adobe ou taipa.

Destacam-se duas arquiteturas históricas, a pombalina e gaioleiro, comuns na utilização da parede resistente de alvenaria de pedra, uma das quais se sucede à anterior no tempo, refere-se aos edifícios de nome “gaioleiro”. No parque edificado, são os edifícios mais encontrados em Portugal devido à crescente necessidade de construção rápida para colmatar as necessidades provocadas pelas migrações massivas de população devido à revolução industrial do século XIX. Posto isto, na presente dissertação será enquadrado, a solução construtiva de parede resistente em alvenaria de pedra, utilizada nas construções da fachada de edifícios

gaioleiros, na arquitetura do edifício proposto para caso de estudo, por ser a arquitetura tradicional presente por todo Portugal Continental [47].

4.2.1. Elemento construtivo

A espessura da parede de alvenaria de pedra ordinária calcária, será coerente com a espessura típica de uma fachada principal de um edifício gaioleiro, assumindo-se 0,60 metros de espessura [48] de acordo com a espessura existente no ITE54 [49], com revestimento em argamassa de cal aérea de 0,02 metros de espessura pelo exterior e pelo interior. Conferindo uma resistência térmica de 0,25 m²°C/W e um coeficiente de transmissão térmica de 2,38 W/m².°C.

4.2.1.1. Propriedades dos materiais correspondentes ao elemento construtivo

Para que o programa tenha em consideração durante a simulação todos os fenómenos higrétricos possíveis de simular, será necessário caracterizar as propriedades básicas e complementares do material[50]. Para o presente elemento construtivo os materiais analisados foram retirados da biblioteca do WUFI, pois contemplam todas as propriedades básicas dos materiais, demonstrados na Tabela 4.1.

As propriedades básicas são a massa volúmica [ρ], a porosidade [ψ], calor específico do material seco [c_s], condutibilidade térmica do material seco [λ_0], fator de resistência à difusão de vapor [μ], o teor de água de referência [w_{80}], teor de água de saturação [w_{sat}], suplemento de condutibilidade [b] e coeficiente de capilaridade [A]. A escolha dos materiais da biblioteca foi efetuada tentando-se em consideração o material cujas propriedades mais se aproximavam das propriedades dos materiais estipulados no ITE50 e ITE54 [49], [51].

Tabela 4.1 - Propriedades básicas correspondentes aos materiais que compõem o elemento construtivo. Valores retirados da biblioteca do WUFI Plus.

Propriedades básicas	Unidades	Materiais	
		Pedra calcária	Argamassa Cal aérea
Massa volúmica	[kg/m ³]	2650	1571
Porosidade	[m ³ /m ³]	0,03	0,39
Calor específico	[J/kg.°C]	2600	850
Condutibilidade térmica do material seco	[W/m.°C]	3	0,82
Fator de resistência à difusão de vapor	[-]	35,7	9,61
Teor de água de referência	[kg/m ³]	-	4,23
Teor de água de saturação	[kg/m ³]	-	318,33
Suplemento de condutibilidade térmica	[W/m°C ²]	0,0002	0,0002
Coeficiente de capilaridade	[kg/m ² .s ^{0,5}]	-	0,19

4.3. Parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico furado

A solução construtiva de parede dupla em alvenaria de tijolo cerâmico furado apareceu no período histórico da década de 60 do século XX, devido à produção e utilização massiva do betão armado para execução de estruturas reticuladas, entrando-se assim na fase histórica denominada de “construção moderna”. A proliferação do betão armado nas construções de edifícios, fez com que este tipo de soluções deixasse assim de ter exigências estruturais, passando apenas a servir como enchimento das paredes envolventes dos edifícios, virando-se a atenção para exigências no âmbito do conforto na ocupação do interior, ou seja, conforto térmico. Em Portugal é possível observa-se nas construções a partir da década de 60 a execução de duas paredes de alvenaria separadas por uma caixa de ar [52], começando a haver variações na espessura da parede em contacto com exterior como se observa nas soluções construtivas dos anos 70 onde houve uma redução na espessura da parede exterior, igualando a espessura da parede interior, devendo-se ao facto de neste período da história ainda não terem sido criados regulamentos para requisitos térmicos. Nos anos 80 é criado pela primeira vez em Portugal uma solução construtiva que engloba isolamento térmico no seu conjunto de elementos, ou seja, uma solução construtiva cuja parede exterior aumentou de espessura em comparação com a redução nos anos 70 e inseriu-se isolamento térmico, preenchendo toda a caixa de ar entre o pano de alvenaria em contacto com exterior e o pano interior, coincidindo com a altura em que os primeiros regulamentos sobre requisitos térmicos começaram a ser publicados em Portugal. Esta solução de parede dupla com isolamento térmico preenchendo na totalidade a caixa de ar ainda se mantém até aos dias de hoje, será esta solução construtiva que será analisada na presente dissertação.

4.3.1. Elemento construtivo

O elemento construtivo é composto por, uma camada exterior e interior de revestimento em argamassa de cimento e cal aérea, com uma espessura de 2 centímetros, o pano de tijolo cerâmico furado exterior é constituído por tijolo 30x20x22, tendo 22 centímetros de espessura, o pano de tijolo cerâmico furado interior é constituído por tijolo 30x20x11, tendo 11 centímetros de espessura, por fim, a parede dupla contém um espaço de ar entre o pano interior e exterior com uma espessura de 0,025 centímetros. Conferindo uma resistência térmica de 0,64 m²°C/W e um coeficiente de transmissão térmica de 1,23 W/m².°C.

4.3.1.1. Propriedades dos materiais correspondentes ao elemento construtivo

Este material foi criado como um novo material no WUFI Plus cujas propriedades foram adaptadas a um material existente na biblioteca do programa, conseguindo-se obter propriedades complementares, alterando-se os valores de calor específico e fator de resistência à difusão do vapor de água do material original da biblioteca para os valores apresentados na Tabela 4.2. A escolha dos materiais da biblioteca foi efetuada selecionando-se o material cujas propriedades mais se aproximam das propriedades dos materiais estipulados no ITE50.

Tabela 4.2-Propriedades básicas correspondentes aos materiais que compõem o elemento construtivo. Valores retirados da biblioteca do WUFI Plus. Elemento construtivo que compõe a parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico.

Propriedades básicas	Unidades	Materiais	
		Argamassa Cal aérea e Cimento	Tijolo furado cerâmico
Massa volúmica	[kg/m ³]	1910	1935
Porosidade	[m ³ /m ³]	0,25	0,217
Calor específico	[J/kg.°C]	850	1000
Condutibilidade térmica do material seco	[W/m.°C]	0,8	0,77
Fator de resistência à difusão de vapor	[-]	45,89	27
Teor de água de referência	[kg/m ³]	-	-
Teor de água de saturação	[kg/m ³]	-	-
Suplemento de condutibilidade térmica	[W/m°C ²]	0,0002	0,0002
Coeficiente de capilaridade	[kg/m ² .s ^{0,5}]	-	-

4.4. Parede simples de um pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado

A solução construtiva de parede de pano simples em alvenaria de tijolo cerâmico furado tem o primeiro aparecimento em construções datadas por volta da década de 90 do século XX devido à adoção de sistemas de isolamento térmico pelo exterior, porém em Portugal teve pouca expressão, intensificando-se apenas no século XXI. A execução de parede dupla começou a originar problemas devido a novos regulamentos e normas de execução em obra, tais como a necessidade de executar cofragem na estrutura de betão armado, permitir a cura do betão originando pausas em obra, erros de execução em obra, erros de projeto e especificação. Para fazer face às dificuldades de execução, começou-se a adotar em Portugal a solução construtiva de pano simples de tijolo cerâmico, utilizando-se revestimento exterior com isolamento térmico [46].

4.4.1. Elemento construtivo

O elemento construtivo é composto por uma camada exterior e interior de revestimento em argamassa de cimento e cal aérea, com uma espessura de 2 centímetros, o pano de tijolo cerâmico furado é constituído por tijolo 30x20x22, tendo 22 centímetros de espessura. Conferindo uma resistência térmica de 0,34 m²°C/W e um coeficiente de transmissão térmica de 1,98 W/m².°C.

4.4.1.1. Propriedades dos materiais correspondentes ao elemento construtivo

Este material foi criado como um novo material no WUFI Plus cujas propriedades foram adaptadas a um material existente na biblioteca do programa, alterando-se os valores de calor específico e fator de resistência à difusão do vapor de água do material original da biblioteca para valores apresentados na Tabela 4.3. A escolha dos materiais da biblioteca foi efetuada selecionando-se o material cujas propriedades mais se aproximam das propriedades dos materiais estipulados no ITE50 [51].

Tabela 4.3 - Valores retirados da biblioteca do WUFI Plus. Elemento construtivo que compõe a parede simples de um pano de alvenaria de tijolo cerâmico.

Propriedades básicas	Unidades	Materiais	
		Argamassa Cal aérea e Cimento	Tijolo furado cerâmico
Massa volúmica	[kg/m ³]	1910	1935
Porosidade	[m ³ /m ³]	0,25	0,217
Calor específico	[J/kg.°C]	850	1000
Condutibilidade térmica do material seco	[W/m.°C]	0,8	0,77
Fator de resistência à difusão de vapor	[-]	45,89	27
Teor de água de referência	[kg/m ³]	-	-
Teor de água de saturação	[kg/m ³]	-	-
Suplemento de condutibilidade térmica	[W/m°C ²]	0,0002	0,0002
Coefficiente de capilaridade	[kg/m ² .s ^{0,5}]	-	-

4.5. Vãos envidraçados e cobertura

Os vãos envidraçados foram selecionados para todas as soluções construtivas a partir da biblioteca do WUFI Plus, escolhendo-se o que melhor se aproxima das realidades comuns das envolventes dos edifícios em Portugal, optando-se por escolher um material da biblioteca cujos valores das propriedades fossem aproximadas às propriedades estipuladas no ITE50 [51], sendo neste caso o valor de coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado (U_w). Selecionou-se assim um vão envidraçado de vidro duplo com caixilharia metálica cujo valor de U_w é 2,8 W/m².°C.

Na cobertura, foi composta uma cobertura plana constituída por uma camada de impermeabilização, camada de forma com 10 centímetros de espessura, betão armado com 30 centímetros e estuque com 2 centímetros. Conferindo uma resistência térmica de 0,30 m²°C/W e um coeficiente de transmissão térmica de 2.10 W/m².°C.

5 Análise Higrotérmica do modelo computacional

Na presente dissertação, os dados climáticos usados para as simulações são referentes às localizações mencionadas nos capítulos anteriores. A análise teve como objetivo demonstrar a aplicabilidade do ficheiro climático *Moisture Reference Year* criado para cada localização, analisar o modelo geométrico constituído por três paredes de diferentes tipos de soluções construtivas simples, obtendo-se as variações de temperatura e humidade relativa do ambiente interior e necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento do modelo geométrico construído.

Após a inserção do ficheiro climático, MRY, no programa, é automaticamente efetuada uma análise sobre o ficheiro climático, sendo obtido a temperatura e humidade relativa exterior média, mínima e máxima, cujos valores relativos a cada localização encontram-se demonstrados na tabela abaixo. Efetuou-se um total de 102 simulações em WUFI Plus. Em cada localização analisaram-se três tipos de elementos construtivos verticais em situações sem sistema de ventilação mecânica e de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) e com sistema de ventilação mecânica e AVAC. Sendo que, para a situação sem sistemas foi utilizado os valores de temperatura do ambiente interior para uma análise sobre a quantidade, em horas, de temperatura fora dos limites de temperatura de conforto estabelecidos pelo Regulamento de Energia e Humidade (REH) [53], tendo como mínimo 18°C e máximo 25°C. Para a situação com sistemas, foi contabilizado as necessidades energéticas anuais para aquecimento e arrefecimento do ambiente interior do modelo em análise, programando-se o WUFI Plus para que os sistemas funcionem assim que se detete uma descida abaixo dos 18°C e uma subida acima dos 25°C.

Na Tabela 5.1 é demonstrada a temperatura mínima, média e máxima para o ambiente exterior criado pelo ficheiro climático, bem como a humidade relativa mínima, média e máxima.

Tabela 5.1 - Temperatura e humidade relativa máxima, mínima e média após leitura do ficheiro climático inserido no *software* WUFI Plus. Ambiente exterior.

Localizações	Temperatura (°C)			Humidade relativa (%)		
	mínimo	média	máximo	mínimo	média	máximo
Bragança	-7,5	13,8	37,7	9,0	61,3	99,0
Vila real	-4,9	14,6	37,3	12,0	66,0	99,0
Viana do Castelo	-2,8	14,5	35,6	22,0	80,6	100,0
Braga	-2,9	14,8	34,7	18,0	77,0	18,0
Guarda	-2,0	16,9	40,7	9,0	67,5	99,0
Viseu	-4,0	14,4	36,7	8,0	68,6	100,0
Aveiro	1,8	16,1	34,9	14,0	74,8	96,0
Coimbra	0,2	15,0	40,6	3,0	66,7	100,0
Castelo Branco	-1,9	17,2	40,8	8,0	57,6	100,0
Leiria	-5,5	15,2	38,8	14,0	74,9	97,0
Lisboa	6,3	17,9	39,0	13,0	69,7	100,0
Santarém	-2,2	17,1	42,2	11,0	69,3	100,0
Sines	0,6	16,1	29,4	22,0	76,4	98,0
Portalegre	2,1	16,9	40,6	8,0	63,6	100,0
Évora	-2,3	17,2	43,5	10,0	64,6	100,0
Beja	-1,5	17,5	43,2	8,0	63,5	100,0
Faro	3,2	19,1	36,9	16,0	63,5	99,0

Visto que o modelo geométrico é dividido pelo programa em várias zonas correspondentes a ambientes interiores, optou-se por analisar apenas a zona mais gravosa em termos de ganhos solares por existir maior incidência de radiação, definindo-se assim a fachada a Sudoeste da rosa do piso inferior devido a ter uma vão envidraçado maior que o piso superior. Nas figuras abaixo, a rosa dos ventos da radiação solar demonstra a soma anual da radiação incidente na superfície em função da inclinação e da orientação da superfície do elemento construtivo, variando de 0° a 90°, em que a vermelho representa-se os menores valores, a amarelo os médios e a verde os maiores valores da soma anual.

A rosa dos ventos da chuva incidente representa a soma anual da chuva incidente na superfície relativo à orientação do elemento construtivo.

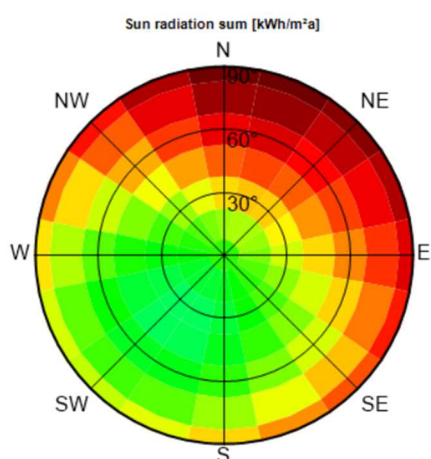


Figura 5.1 - Representação da rosa dos ventos relativamente à soma anual da radiação solar na superfície, para Viseu. Captado através do programa WUFI Plus.

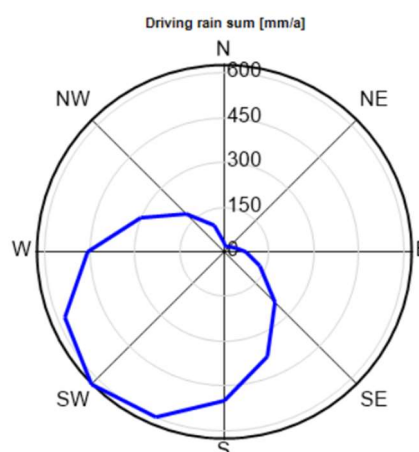


Figura 5.2 - Representação da rosa dos ventos relativamente à soma da chuva incidente na superfície, para Viseu. Captado através do programa WUFI Plus.

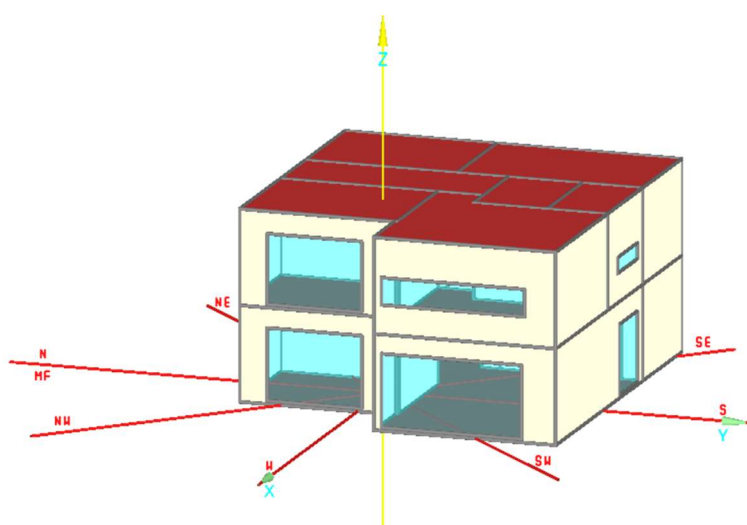


Figura 5.3 - Modelo 3D dividido em ambientes interiores. Captado do programa WUFI Plus.

5.1. Parede de alvenaria de pedra

5.1.1. Análise sem sistemas de ventilação e AVAC

Foram analisadas dezassete localizações e contabilizado a quantidade de horas fora dos limites de temperatura de conforto relativos ao clima interior do modelo geométrico para o ano de referência construído sem sistemas de ventilação e AVAC. Apurou-se que a localização com maior número de horas abaixo de 18°C é a localização de Coimbra com 5196 horas sendo cerca de 59,3% do ano de referência, atingindo a temperatura interior mínima de 8,7°C. A localização com menor número de horas abaixo de 18°C é Faro com 2664 horas, sendo cerca de 30,4% do ano de referência, atingindo a temperatura interior mínima de 12°C. A localização com maior número de horas acima de 25°C é Faro com 2934 horas, sendo cerca de 33,5% do ano de referência, atingindo a temperatura interior máxima de 30°C. A localização com menor número de horas acima dos 25°C é Leiria que atinge a temperatura interior máxima de 24,5°C. De seguida é demonstrado os gráficos de linhas relativos à variação da temperatura interior para as localizações acima mencionadas. Os restantes gráficos sobre as localizações em falta neste capítulo serão apresentados no Anexo D.

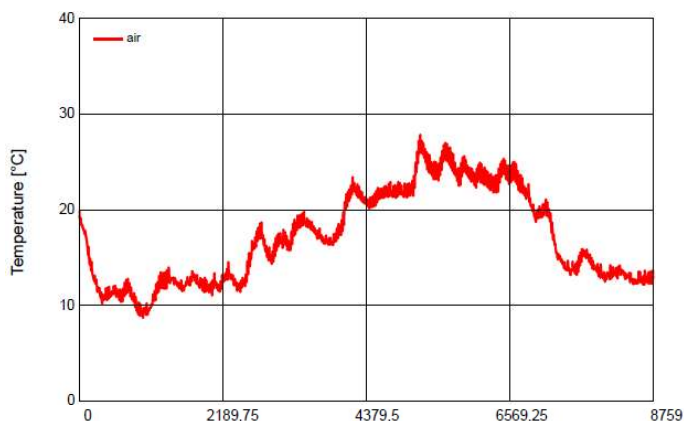


Figura 5.5 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Coimbra

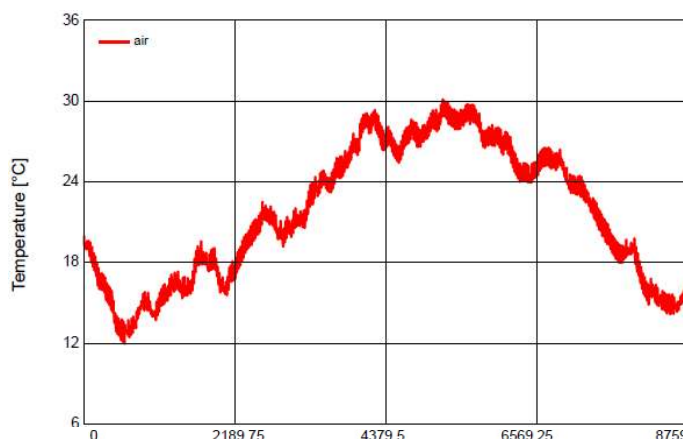


Figura 5.4 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Faro.

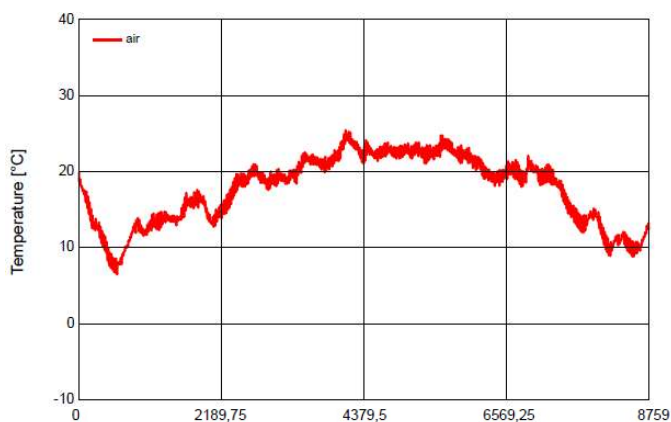


Figura 5.6 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Leiria.

Na Tabela 5.2 estão apresentados os cálculos da temperatura e humidade relativa mínima, média e máxima, para o interior do modelo computacional analisado com o efeito do ficheiro climático criado para cada localização apresentada.

Tabela 5.2 - Apresentação de temperatura e humidade relativa para todas as localizações em estudo, após análise efetuada através de simulações no programa WUFI Plus, para a envolvente vertical de parede de alvenaria de pedra ordinária.

Localizações	Temperatura (°C)			Humidade relativa (%)		
	mínimo	media	máximo	mínimo	media	máximo
Bragança	4,3	16,2	29,2	55,0	83,3	79,7
Vila real	6,3	16,9	28,5	55,0	83,0	79,7
Viana do Castelo	7,3	16,9	24,1	55,0	82,1	79,8
Braga	7,1	17,0	25,4	55,0	79,8	82,7
Guarda	8,2	19,2	30,5	55,0	79,7	82,4
Viseu	6,9	16,8	27,5	55,0	79,8	82,2
Aveiro	10,3	18,3	24,5	55,0	79,7	82,2
Coimbra	8,7	17,0	27,9	55,0	82,0	79,8
Castelo Branco	8,5	19,6	31,9	55,0	79,6	82,3
Leiria	6,5	17,6	24,5	55,0	79,7	82,4
Lisboa	12,9	20,2	29,5	55,0	79,6	81,2
Santarém	9,4	19,5	28,9	55,0	79,7	82,1
Sines	10,9	18,6	24,5	55,0	79,7	82,2
Portalegre	10,8	19,1	33,5	55,0	79,7	81,9
Évora	8,5	19,6	30,7	55,0	79,7	82,2
Beja	8,8	19,9	31,1	55,0	79,6	81,9
Faro	12,0	21,6	30,1	55,0	79,5	81,6

5.1.2. Análise com sistemas de ventilação e AVAC

Após a análise higrotérmica sobre o modelo geométrico sem sistemas de ventilação e AVAC, optou-se por renovar a análise incorporando um sistema AVAC e de ventilação mecânica ao modelo, programando-se o sistema AVAC para funcionar apenas quando as temperaturas diminuía abaixo dos 18°C e aumentavam acima dos 25°C para qualquer hora do dia e a ventilação mecânica trabalhando todo o dia, com o objetivo de contabilizar a energia necessária anualmente para aquecimento e arrefecimento do modelo, caracterizando energeticamente a maioria do território de Portugal continental.

Efetuada novamente a simulação higrotérmica sobre o modelo através do programa WUFI Plus, obtiveram-se os seguintes resultados, a localização que mais necessidade tem para aquecimento é a localização de Vila Real com o valor de 16378,4 kWh/ano, a que tem menos necessidade de aquecimento é a localização de Faro com o valor de 2853,4 kWh/ano. A localização que tem mais necessidade de aquecimento é Portalegre com o valor de 2094,1 kWh/ano, as que têm menos necessidades de arrefecimento são as localizações de Viana do Castelo, Braga, Aveiro e Sines, com 0 kWh/ano, ou seja, não foi necessário a ativação do sistema para arrefecimento para estes locais. Os valores calculados para todas as localizações analisadas poderão ser observados na Tabela 5.3. A localização do Porto não foi estudada devido a, falhas de informação nos ficheiros fornecidos, não sendo possível obter dados climáticos suficientes que fossem comuns ao intervalo de tempo das restantes localizações. Optou-se assim por não efetuar simulações higrotérmicas num modelo inserido no Porto.

Tabela 5.3 - Apresentação dos resultados sobre a simulação efetuada pelo programa WUFI Plus, acerca das necessidades de aquecimento e arrefecimento para as localizações em estudo.

Localizações	Necessidades de Aquecimento (kWh/ano)	Necessidades de Arrefecimento (kWh/ano)
Bragança	12319,6	524,4
Vila real	16378,4	62,5
Viana do Castelo	9652,9	4,4
Braga	5952,0	193
Guarda	6950,6	1402,5
Viseu	10086,7	148,1
Aveiro	3790,9	3,8
Coimbra	6724,1	121,0
Castelo Branco	7043,2	1964,2
Leiria	7204,6	60,4
Lisboa	3397,9	563,5
Santarém	5434,9	513,7
Sines	5566,2	71,7
Portalegre	8729,9	2094,1
Évora	6810,7	1645,6
Beja	4628,6	1440,0
Faro	2853,5	1786,1

Podemos observar na Figura 5.7 que as regiões que necessitarão de maior energia para aquecimento são as regiões a Norte de Portugal continental, tornando-se mais gravosa a necessidade de aquecimento para as regiões fronteiriças a Norte, tais como, Vila Real, Bragança e Viana do Castelo, observando-se uma redução gradual nas necessidades de energia para aquecimento à medida que se progride para as localizações a Sul do país.

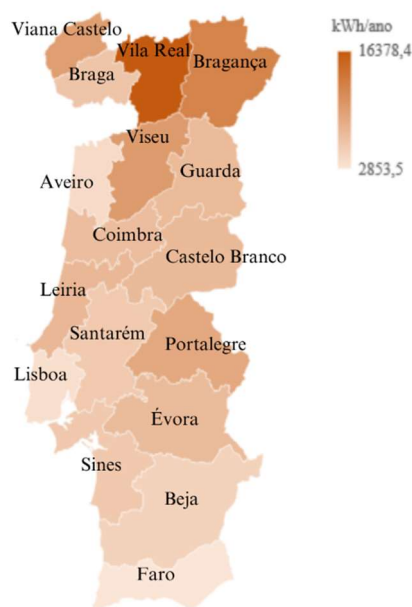


Figura 5.7 - Caracterização de localizações de Portugal continental correspondente às necessidades de aquecimento anuais (kWh/ano) para cada localização.

Podemos observar na Figura 5.8 que as regiões que necessitarão de maior energia para arrefecimento são as regiões a Sul de Portugal continental e a Este (regiões centro e sul), tornando-se mais gravosa a necessidade de arrefecimento para as regiões fronteiriças, tais como, Faro, Beja, Évora, Portalegre, Castelo Branco, observando-se uma redução gradual nas necessidades de energia para arrefecimento à medida que se progride para as localizações a Norte do país e litoral.

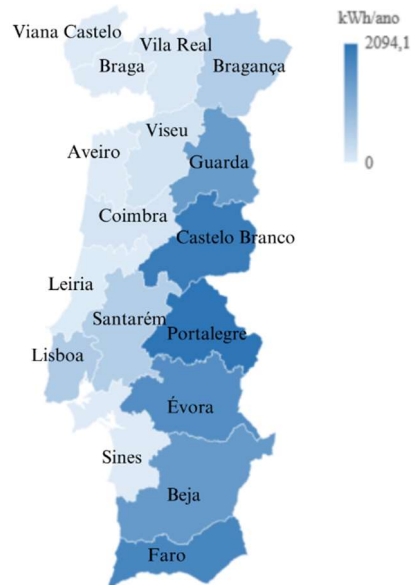


Figura 5.8 - Caracterização de localizações de Portugal continental correspondente às necessidades de arrefecimento anuais (kWh/ano) para cada localização.

Uma análise final ao consumo energético total ao ano, para garantir o conforto no interior do modelo analisado, foi efetuada somando as necessidades de energia para aquecimento com as necessidades de energia para arrefecimento relativo a cada uma das localizações estudadas. Observa-se na Tabela 5.4 que o maior resultado de consumo energético foi na localização de Vila Real onde, por ano, será necessário 16440,9 kWh/ano de energia para garantir o conforto no interior, totalizando os gastos da estação de verão como em inverno, estando em segundo lugar a localização de Bragança com 12844,0 kWh/ano e em terceiro, Portalegre consumindo 10824,0 kWh/ano. Os menores resultados sobre os consumos energéticos observam-se nas localizações de Aveiro com 3790,0 kWh/ano, de Lisboa com 3961,4 kWh/ano e Faro com 4639,6 kWh/ano.

Tabela 5.4 - Resultados relativos aos cálculos dos consumos energéticos totais.

Localizações	Necessidade total de energia (kWh/ano)
Bragança	12844,0
Vila real	16440,9
Viana do Castelo	9652,9
Braga	5952,0
Guarda	8353,1
Viseu	10234,8
Aveiro	3790,9
Coimbra	6845,1
Castelo Branco	9007,4
Leiria	7211,0
Lisboa	3961,4
Santarém	5948,6
Setúbal	5566,2
Portalegre	10824,0
Évora	8456,3
Beja	6068,6
Faro	4639,6

5.2. Parede de pano simples de tijolo cerâmico

5.2.1. Análise sem sistemas de ventilação e AVAC

Após a definição dos elementos que constituem a solução construtiva da envolvente, foram analisadas dezassete localizações e contabilizado a quantidade de horas fora dos limites de temperatura de conforto relativos ao clima interior do modelo geométrico para o ano de referência construído sem sistemas de ventilação e AVAC. Apurou-se que a localização com maior número de horas com temperatura interior inferior a 18°C é a localização de Coimbra com 5240 horas sendo cerca de 59,8% do ano de referência, atingindo a temperatura interior mínima de 8,9°C. A localização com menor número de horas com temperatura interior inferior a 18°C é Faro com 2735 horas, sendo cerca de 31,2% do ano de referência, atingindo a temperatura interior mínima de 12,4°C. A localização com maior número de horas com temperatura interior superior a 25°C é Faro com 2855 horas, sendo cerca de 31,8% do ano de referência, atingindo a temperatura máxima de 29,7°C. a localização com menor número de horas com temperatura interior superior a 25°C é Leiria com 0 horas, atingindo a temperatura máxima de 24,9°C. De seguida é demonstrado os gráficos de linhas relativos à variação da temperatura interior para as localizações acima mencionadas Figura 5.10, Figura 5.9, Figura 5.11. Os restantes gráficos sobre as localizações em falta neste capítulo serão apresentados no Anexo C.



Figura 5.10 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Coimbra



Figura 5.9 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Faro.

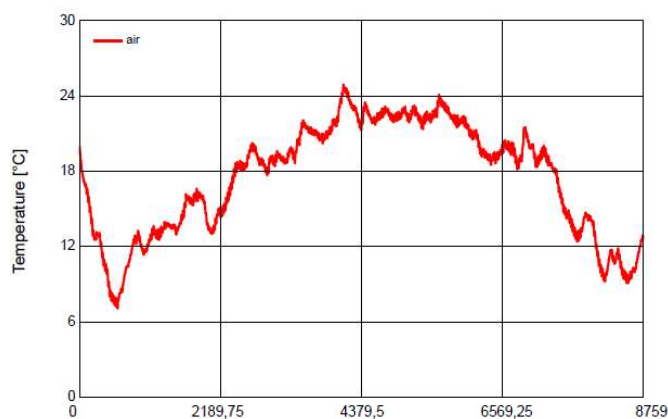


Figura 5.11 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Leiria.

Na Tabela 5.5 estão apresentados os cálculos da temperatura e humidade relativa mínima, media e máxima, para o interior do modelo computacional analisado com o efeito do ficheiro climático criado para cada localização apresentada.

Tabela 5.5 - Apresentação de temperatura e humidade relativa para todas as localizações em estudo, após análise efetuada através de simulações no programa WUFI Plus, para a envolvente vertical de parede de alvenaria de tijolo cerâmico.

Localizações	Temperatura (°C)			Humidade relativa (%)		
	mínimo	media	máximo	mínimo	media	máximo
Bragança	4,5	16,1	28,3	55,0	79,7	82,0
Vila real	6,7	16,8	27,8	55,0	79,8	81,7
Viana do Castelo	7,8	16,8	23,7	55,0	79,9	81,5
Braga	7,3	16,9	24,9	55,0	81,6	79,9
Guarda	8,3	19,1	29,6	55,0	79,6	81,5
Viseu	7,1	16,7	26,8	55,0	79,8	81,8
Aveiro	9,8	18,2	25,9	55,0	79,4	80,9
Coimbra	8,9	17,0	27,4	55,0	79,8	81,1
Castelo Branco	8,8	18,5	31,0	55,0	79,6	81,6
Leiria	7,1	17,5	24,9	55,0	81,6	79,9
Lisboa	13,1	20,1	28,6	55,0	79,7	80,9
Santarém	10,0	19,4	28,3	55,0	79,8	81,4
Sines	10,9	18,4	23,9	55,0	79,9	81,0
Portalegre	10,9	19,0	32,5	55,0	79,6	81,1
Évora	9,0	19,5	29,9	55,0	79,7	81,6
Beja	9,3	19,8	30,2	55,0	79,6	81,4
Faro	12,4	21,4	29,7	55,0	79,6	81,2

5.2.2. Análise com sistemas de ventilação e AVAC

Após a análise higrotérmica sobre o modelo geométrico sem sistemas de ventilação e AVAC, optou-se por renovar a análise incorporando um sistema AVAC e de ventilação mecânica ao modelo, programando-se o sistema AVAC para funcionar apenas quando as temperaturas diminuía abaixo dos 18°C e aumentavam acima dos 25°C para qualquer hora do dia e a ventilação mecânica trabalhando todo o dia, com o objetivo de contabilizar a energia necessária anualmente para aquecimento e arrefecimento do modelo, caracterizando energeticamente a maioria do território de Portugal continental.

Efetuada novamente a simulação higrotérmica sobre o modelo através do programa WUFI Plus, obtiveram-se os seguintes resultados. A localização que mais necessidade tem para aquecimento é a localização de Bragança com o valor de 11261,1 kWh/ano, a que tem menos necessidade de aquecimento é a localização de Faro com o valor de 3141,4 kWh/ano. A localização que tem mais necessidade de aquecimento é Portalegre com o valor de 2023,1 kWh/ano, as que têm menos necessidades de arrefecimento são as localizações de Viana do Castelo, Braga e Sines, com 0 kWh/ano, ou seja, não foi necessário a ativação do sistema para arrefecimento para estes locais. Os valores calculados para todas as localizações analisadas poderão ser observados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Apresentação dos resultados sobre a simulação efetuada pelo programa WUFI Plus, acerca das necessidades de aquecimento e arrefecimento para as localizações em estudo.

Localizações	Necessidades de Aquecimento (kWh/ano)	Necessidades de Arrefecimento (kWh/ano)
Bragança	11261,1	464,8
Vila real	10900,6	254,4
Viana do Castelo	8792,8	8,4
Braga	7431,2	224,6
Guarda	7574,2	1405,8
Viseu	8773,8	106,1
Aveiro	4445,9	9,1
Coimbra	7512,0	116,1
Castelo Branco	5966,5	1960,5
Leiria	7805,5	50,4
Lisboa	3731,9	536,3
Santarém	5922,2	399,5
Sines	6007,1	274,6
Portalegre	8109,2	2023,3
Évora	7407,0	1574,4
Beja	5195,2	1423,8
Faro	3141,1	1812,2

Podemos observar na Figura 5.12 que as regiões que necessitarão de maior energia para aquecimento são as regiões a Norte de Portugal continental, tornando-se mais gravosa a necessidade de aquecimento para as regiões fronteiriças a Norte, tais como, Vila Real e Bragança, observando-se uma redução gradual nas necessidades de energia para aquecimento à medida que se progride para as localizações a Sul do país.

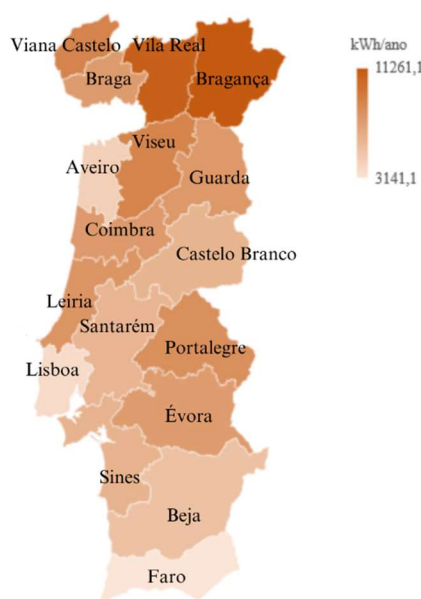


Figura 5.12 - Caracterização de localizações de Portugal continental correspondente às necessidades de aquecimento anuais (kWh/ano) para cada localização.

Podemos observar na Figura 5.13 que as regiões que necessitarão de maior energia para arrefecimento são as regiões a Sul de Portugal continental e a Este (regiões centro e sul), tornando-se mais gravosa a necessidade de arrefecimento para as regiões fronteiriças, tais como, Faro, Beja, Évora, Portalegre, Castelo Branco, observando-se uma redução gradual nas necessidades de energia para arrefecimento à medida que se progride para as localizações a Norte do país e litoral.

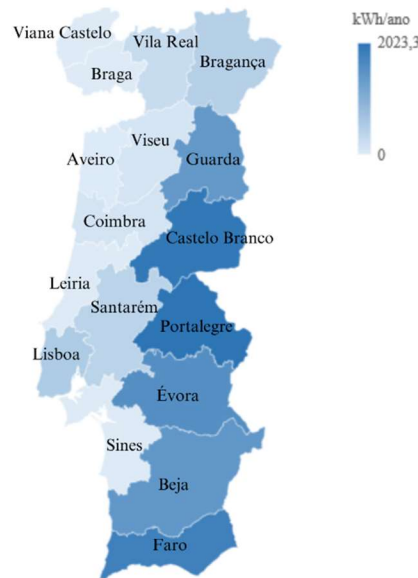


Figura 5.13 - Caracterização de localizações de Portugal continental correspondente às necessidades de arrefecimento anuais (kWh/ano) para cada localização.

Uma análise final ao consumo energético total ao ano para garantir o conforto no interior do modelo analisado, foi efetuada somando as necessidades de energia para aquecimento com as necessidades de energia para arrefecimento relativo a cada uma das localizações estudadas. Observa-se na Tabela 5.7 que o maior resultado de consumo energético foi na localização de Bragança onde, por ano, será necessário 11725,9 kWh/ano de energia para garantir o conforto no interior, totalizando os gastos da estação de verão como em inverno, estando em segundo lugar a localização de Vila Real com 11155,0 kWh/ano e em terceiro, Portalegre consumindo 10132,0 kWh/ano. Os menores resultados sobre o consumo energético observam-se nas localizações de Lisboa com 4268,2 kWh/ano, de Aveiro com 4455,0 kWh/ano e Faro com 4953,0 kWh/ano.

Tabela 5.7 - Resultados relativos aos cálculos dos consumos energéticos totais.

Localizações	Necessidade total de energia (kWh/ano)
Bragança	11725,9
Vila real	11155,0
Viana do Castelo	8792,8
Braga	7431,2
Guarda	8980,0
Viseu	8879,9
Aveiro	4455,0
Coimbra	7628,1
Castelo Branco	7927,0
Leiria	7805,9
Lisboa	4268,2
Santarém	6321,7
Sines	6007,1
Portalegre	10132,5
Évora	8981,4
Beja	6619,0
Faro	4953,3

5.3. Parede dupla

5.3.1. Análise sem sistemas de ventilação e AVAC

Foram analisadas dezassete localizações e contabilizado a quantidade de horas fora dos limites de temperatura de conforto relativos ao clima interior do modelo geométrico para o ano de referência construído sem sistemas de ventilação e AVAC. Apurou-se que a localização com maior número de horas com temperaturas interiores inferiores a 18°C é a localização de Bragança com 5100 horas sendo cerca de 58,2% do ano de referência, atingindo um mínimo de temperatura interior de 5,6°C. A localização com menor número de horas com temperaturas inferiores a 18°C é Faro com 2784 horas sendo cerca 31,8% atingindo um mínimo de temperatura interior de 13,2°C. A localização com maior número de horas com temperaturas interiores superiores a 25°C é Faro com 3082 horas, sendo 32,6% do ano de referência, atingindo uma temperatura interior máxima de 29,5°C. A localização com menor número de horas com temperaturas superiores a 25°C são os locais de Aveiro, Braga, Sines, Leiria e Viana do Castelo com 0 horas, atingindo temperaturas interiores máximas de 25°C, 24,4°C, 23,9°C, 24,3°C e 23,4°C respetivamente. De seguida é demonstrado os gráficos de linhas relativos à variação da temperatura interior para as localizações acima mencionadas. Os restantes gráficos sobre as localizações em falta neste capítulo serão apresentados no Anexo C.

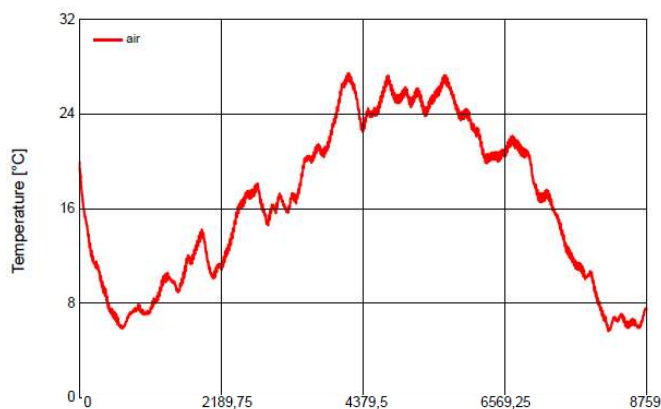


Figura 5.14 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Bragança.



Figura 5.15 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Sines.

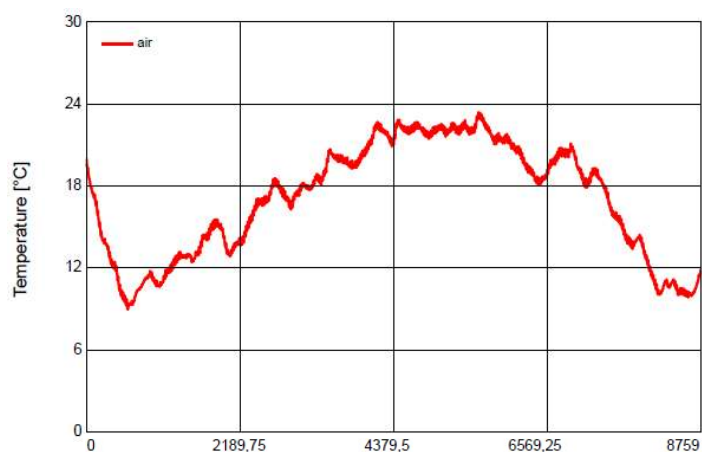


Figura 5.16 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Viana do Castelo.

Na Tabela 5.8 estão apresentados os cálculos da temperatura e humidade relativa mínima, média e máxima, para o interior do modelo computacional analisado com o efeito do ficheiro climático criado para cada localização apresentada.

Tabela 5.8 - Apresentação de temperatura e humidade relativa para todas as localizações em estudo, após análise efetuada através de simulações no programa WUFI Plus, para a envolvente vertical de parede dupla de alvenaria cerâmica.

Localizações	Temperatura (°C)			Humidade relativa (%)		
	mínimo	media	máximo	mínimo	media	máximo
Bragança	5,6	16,4	27,5	55,0	79,9	81,9
Vila real	7,5	17,1	26,9	55,0	79,9	81,6
Viana do Castelo	8,9	17,0	23,4	55,0	80,0	81,5
Braga	7,9	17,1	24,4	55,0	80,0	81,5
Guarda	8,8	19,3	29,6	55,0	81,5	79,8
Viseu	8,0	17,0	26,4	55,0	79,9	81,6
Aveiro	10,2	18,4	25,0	55,0	79,6	81,1
Coimbra	9,6	17,2	26,2	55,0	80,0	81,1
Castelo Branco	9,6	19,7	30,8	55,0	79,8	81,5
Leiria	8,3	17,7	24,3	55,0	79,9	81,6
Lisboa	13,7	20,2	28,1	55,0	79,8	80,8
Santarém	10,7	19,6	27,4	55,0	79,9	81,4
Sines	11,6	18,6	23,9	55,0	79,9	81,1
Portalegre	11,4	19,3	31,4	55,0	79,8	81,0
Évora	9,8	19,8	29,7	55,0	79,9	81,6
Beja	10,3	20,0	29,4	55,0	79,8	81,3
Faro	13,2	21,7	29,5	55,0	79,8	81,2

5.3.2. Análise com sistemas de ventilação e AVAC

Após a análise higrotérmica sobre o modelo geométrico sem sistemas de ventilação e AVAC, optou-se por renovar a análise incorporando um sistema AVAC e de ventilação mecânica ao modelo, programando-se o sistema AVAC para funcionar apenas quando as temperaturas diminuía abaixo dos 18°C e aumentavam acima dos 25°C para qualquer hora do dia e a ventilação mecânica trabalhando todo o dia, com o objetivo de contabilizar a energia necessária anualmente para aquecimento e arrefecimento do modelo, caracterizando energeticamente a maioria do território de Portugal continental.

Efetuada novamente a simulação higrotérmica sobre o modelo através do programa WUFI Plus, obtiveram-se os seguintes resultados. A localização que mais necessidade tem para aquecimento é a localização de Vila Real com o valor de 9052,6 kWh/ano, a que tem menos necessidade de aquecimento é a localização de Faro com o valor de 2603,1 kWh/ano. A localização que tem mais necessidade de aquecimento é Portalegre com o valor de 1831,6 kWh/ano, as que têm menos necessidades de arrefecimento são as localizações de Viana do Castelo, Braga, Aveiro e Sines, com 0 kWh/ano, ou seja, não foi necessário a ativação do sistema para arrefecimento para estes locais. Os valores calculados para todas as localizações analisadas poderão ser observados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Apresentação dos resultados sobre a simulação efetuada pelo programa WUFI Plus, acerca das necessidades de aquecimento e arrefecimento para as localizações em estudo.

Localizações	Necessidades de Aquecimento (kWh/ano)	Necessidades de Arrefecimento (kWh/ano)
Bragança	9027,5	464,8
Vila real	9052,6	158,3
Viana do Castelo	7350,7	74,7
Braga	5952,0	193
Guarda	7497,2	1267,3
Viseu	6983,4	46,0
Aveiro	3563,8	40,0
Coimbra	5965,6	60,7
Castelo Branco	6380,2	1680,8
Leiria	6535,6	70,4
Lisboa	3109,4	434,1
Santarém	5973,0	360,7
Sines	5185,0	245,9
Portalegre	8106,2	1831,6
Évora	6183,9	1344,1
Beja	4089,4	1216,0
Faro	2603,1	1586,7

Podemos observar na Figura 5.17 que as regiões que necessitarão de maior energia para aquecimento são as regiões a Norte de Portugal continental, tornando-se mais gravosa a necessidade de aquecimento para as regiões fronteiriças a Norte e centro, tais como, Vila Real, Bragança e Portalegre, observando-se uma redução gradual nas necessidades de energia para aquecimento à medida que se progride para as localizações a Sul do país.

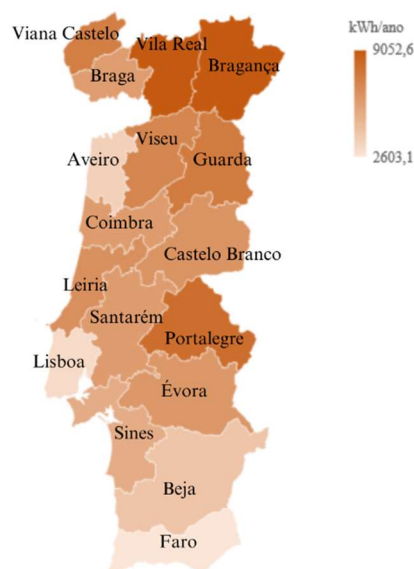


Figura 5.17- Caracterização de localizações de Portugal continental correspondente às necessidades de aquecimento anuais (kWh/ano) para cada localização.

Podemos observar na Figura 5.18 que as regiões que necessitarão de maior energia para arrefecimento são as regiões a Sul de Portugal continental e a Este (regiões centro e sul), tornando-se mais gravosa a necessidade de arrefecimento para as regiões fronteiriças, tais como, Faro, Portalegre e Castelo Branco, observando-se uma redução gradual nas necessidades de energia para arrefecimento à medida que se progride para as localizações a Norte do país e litoral.

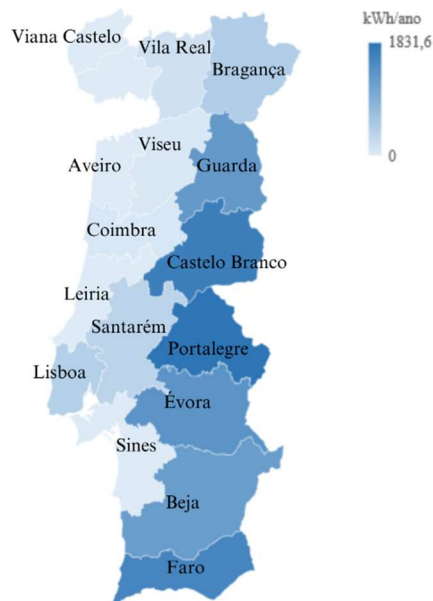


Figura 5.18 - Caracterização de localizações de Portugal continental correspondente às necessidades de arrefecimento anuais (kWh/ano) para cada localização.

Uma análise final ao consumo energético total ao ano, para garantir o conforto no interior do modelo analisado, foi efetuada somando as necessidades de energia para aquecimento com as necessidades de energia para arrefecimento relativo a cada uma das localizações estudadas. Observa-se na Tabela 5.10 que, o maior resultado de consumo energético foi na localização de Portalegre onde, por ano, será necessário 9937,8 kWh/ano de energia para garantir o conforto no interior, totalizando os gastos da estação de verão como em inverno, estando em segundo lugar a localização de Bragança com 9492,3 kWh/ano e em terceiro, Vila Real consumindo 9210 kWh/ano. Os menores resultados sobre o consumo energético observam-se nas localizações de Lisboa com 3543,5 kWh/ano, de Aveiro com 3563,8 kWh/ano e Faro com 4189,8 kWh/ano.

Tabela 5.10 - Resultados relativos aos cálculos dos consumos energéticos totais.

Localizações	Necessidade total de energia (kWh/ano)
Bragança	9492,3
Vila real	9210,9
Viana do Castelo	7350,7
Braga	5952,0
Guarda	8764,5
Viseu	7029,4
Aveiro	3563,8
Coimbra	6026,3
Castelo Branco	8061,0
Leiria	6535,6
Lisboa	3543,5
Santarém	6333,7
Sines	5185,0
Portalegre	9937,8
Évora	7528,0
Beja	5305,4
Faro	4189,8

5.4. Horas de conforto

A Tabela 5.11 e Tabela 5.12 apresentam os resultados referentes à contabilização de horas fora dos limites determinados pelo Regulamento de Energia e Humidade (REH) [53] como conforto, sendo temperaturas inferiores a 18°C e superiores a 25°C. A contabilização foi realizada para os casos de estudo sem sistemas de ventilação e AVAC para se interpretar os comportamentos do ambiente interior do modelo computacional face às condições climáticas exteriores. Para a solução construtiva de parede simples de alvenaria de tijolo cerâmico, a localização que apresentou piores resultados, i.e valores elevados de horas contabilizadas fora dos limites de conforto, inferiores a 18°C de limite de conforto foi a localização de Coimbra, com Bragança ligeiramente abaixo na contabilização de horas, sendo uma diferença de 142 horas, e superior a 25°C a localização de Faro, contudo, poder-se-ia inserir Beja, Castelo Branco e Évora como localizações com mais horas fora dos limites de conforto pois a diferença com Faro é cerca de 300 horas. Para a solução construtiva de parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico furado, a localização que apresentou piores resultados inferiores a 18°C foi Coimbra, com Bragança em segundo lugar existindo uma diferença de 184 horas fora dos limites de conforto comparando com Coimbra, e superior a 25°C é Faro, contudo, com cerca de 400 horas de diferença com Faro estão as localizações de Beja e Castelo Branco. Para a solução construtiva de parede resistente de pedra, Coimbra é a localização com mais horas fora do limite de conforto de temperaturas inferiores a 18°C, colocando-se Bragança em segundo com uma diferença de 183 horas com Coimbra, e com temperatura superior a 25°C está a localização de Faro, seguindo-se de Beja, Évora e Castelo Branco com diferenças de cerca de 400 horas fora dos limites de conforto.

Entende-se que a leitura das horas contabilizadas é coerente com as análises efetuadas para as três soluções construtivas, observando-se que as localizações com maiores necessidades de arrefecimento e aquecimento coincidem com as localizações que apresentam mais horas fora dos limites de conforto.

Tabela 5.11 - Apresentação da quantidade acumulada de horas abaixo da temperatura interior de conforto de 18°C, para todas as localizações analisadas.

Localizações	Horas fora dos limites de conforto (h)		
	Temperatura inferior a 18°C		
	Tipo de parede		
	Parede simples	Parede dupla	Parede resistente de pedra
Bragança	5098	5100	5013
Vila real	4642	4676	4560
Viana do Castelo	4673	4451	4570
Braga	4719	4717	4695
Guarda	4313	4204	4253
Viseu	4567	4683	4512
Aveiro	3720	3525	3632
Coimbra	5240	5184	5196
Castelo Branco	3809	3692	3786
Leiria	3779	3764	3739
Lisboa	3705	3624	3658
Santarém	3563	3464	3532
Sines	3904	3789	3810
Portalegre	4362	4317	4356
Évora	3736	3662	3706
Beja	3635	3506	3595
Faro	2735	2784	2664

Tabela 5.12 - Apresentação da quantidade acumulada de horas acima da temperatura interior de conforto de 25°C, para todas as localizações analisadas.

Localizações	Horas fora dos limites de conforto (h)		
	Temperatura superior a 25°C		
	Tipo de parede		
	Parede simples	Parede dupla	Parede resistente de pedra
Bragança	1073	1250	1123
Vila real	561	572	664
Viana do Castelo	59	25	37
Braga	628	588	588
Guarda	2003	2097	2048
Viseu	315	235	381
Aveiro	182	186	106
Coimbra	260	244	326
Castelo Branco	2541	2695	2566
Leiria	95	120	33
Lisboa	1129	1408	1244
Santarém	1198	1574	1292
Sines	442	722	280
Portalegre	1605	1673	1627
Évora	2437	2545	2459
Beja	2518	2624	2513
Faro	2855	3082	2934

Realizando-se o cálculo sobre a totalidade de horas fora dos limites de temperatura de conforto como demonstrado na Tabela 5.13, observa-se que a localização com maior numero de horas fora dos limites de conforto ao longo do ano em análise para a solução construtiva de parede simples de alvenaria de tijolo cerâmico é Bragança estando 72,5 % do ano com temperatura interior fora dos limites de conforto, mantendo-se a localização com mais horas fora do conforto para as restantes soluções construtivas, parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico furado e parede resistente de pedra, com respetivamente 72,9% e 72,5% de horas. A localização que apresenta menor período de horas fora dos limites de temperatura interior de conforto para a solução de parede simples de alvenaria é Aveiro e Leiria, ambos com 43,1%, para a solução construtiva de parede dupla de alvenaria é a localização de Aveiro com 40,2% de horas e para a solução construtiva de parede resistente de pedra é Aveiro com 41,5% de horas fora dos limites de conforto

Tabela 5.13 - Contabilização total e horas fora dos limites de temperatura de conforto.

Localizações	Horas fora dos limites de conforto (%)		
	Tipo de parede		
	Parede simples	Parede dupla	Parede resistente de pedra
Bragança	70,5	72,5	70,1
Vila real	59,4	59,9	59,6
Viana do Castelo	53,4	50,8	52,2
Braga	53,9	53,9	53,7
Guarda	72,1	71,9	71,9
Viseu	55,7	56,1	55,9
Aveiro	43,1	40,2	41,5
Coimbra	62,8	63,1	63,0
Castelo Branco	72,5	72,9	72,5
Leiria	43,1	43,0	42,7
Lisboa	55,2	57,4	56,0
Santarém	54,4	57,5	55,1
Sines	44,6	43,3	43,5
Portalegre	68,1	68,4	68,3
Évora	70,5	70,9	70,4
Beja	70,2	70,0	69,7
Faro	63,8	67,0	63,9

6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

6.1. Conclusões

A presente dissertação consiste em investigar que tipos de ficheiro climáticos existem e que são utilizados pela comunidade científica, efetuando uma revisão dos tipos de ficheiro e métodos matemáticos associados à criação dos mesmos, selecionando um tipo e método para criação de um ano de referência representante do clima de dezassete localizações em Portugal continental e efetuando uma análise de performance higrotérmica a um modelo computacional situado em cada uma das localizações.

Os ficheiros climáticos são comumente criados com base em anos de referência do tipo *Test Reference Year* e *Typical Meteorological Year* devido a estes ficheiros estarem formalizados em normas internacionais, enquanto os métodos para criação de um *Moisture Reference Year* não obtiveram, por enquanto, um consenso quanto ao melhor método para a sua determinação. Contudo, um MRY apresenta vantagens no que respeita a análises higrotérmicas, pois tem um principal foco na humidade e por isso, tem em conta fenómenos de transferência de massa que comprometem a saúde do material de construção e o conforto no interior de um edifício. Porém, a maioria dos métodos visa criar um ano representativo cujo clima tende a ser o mais severo dos anos analisados, cuja probabilidade de ocorrência de tal ano é inferior à de um ano representativo TRY ou TMY, o que leva a resultados extremados quanto aos efeitos do clima exterior sobre o ambiente interior de um edifício e à necessidade de soluções construtivas mais robustas quanto à reabilitação ou um novo projeto para a envolvente. A sua utilidade baseia-se em possibilitar uma previsão sobre o pior cenário possível de ocorrer e analisar o risco de ocorrência de transferência de massa no interior da envolvente e suas quantidades, bem como o efeito das mesmas sobre o ambiente interior.

A criação de um ficheiro climático requer cuidados sobre que variáveis climáticas escolher e de que fontes as obter, como tal, uma revisão do tipo de fontes foi efetuada.

No presente trabalho obtiveram-se dados medidos *in situ* e dados simulados para todas as localizações estudadas. Como é normal acontecer, os dados medidos *in situ* abrigam erros de medição no seu conteúdo, pelo que uma substituição dos erros foi necessária. Para tal, obteve-se a partir de fontes que disponibilizam gratuitamente os dados aos utilizadores os dados simulados que correspondem a todos os anos de dados medidos *in situ*. Previamente à substituição dos dados, foi necessário compatibilizar a informação provenientes de ambas as fontes através de comparações visuais e estatísticas. As comparações visuais indicaram semelhanças para as variáveis temperaturas, humidade relativa, radiação global e, em algumas localizações, precipitação. As variáveis velocidade e direção do vento, pressão atmosférica e precipitação não obtiveram conclusões através das comparações visuais. Devido a não se conseguir retirar conclusões concretas sobre as variáveis medidas e simuladas quanto às comparações visuais, e para tornar mais robusta a análise aos dados climáticos, efetuaram-se comparações através de índices estatísticos. Aferiu-se que as variáveis temperaturas, humidade relativa e radiação global eram aceitáveis para proceder à correção dos erros de medição e que as variáveis precipitações, pressão atmosférica, velocidade do vento e direção do vento eram insatisfatórias. Contudo, estes resultados devem-se ao facto de que estes tipos de variáveis apresentam, em certos casos, valores insatisfatórios por se deverem a variáveis climáticas que são influenciadas nas suas medições pelas condições geográficas *in situ* pelo que os dados obtidos por simulações costumam sobrevalorizar ou subvalorizar estas variáveis medidas no local.

Uma vez efetuada a comparação entre as variáveis medidas *in situ* para cada localização do território português, fornecidas pelo Instituto do Mar e da Atmosfera, e as variáveis construídas a partir de simulações fornecidas pelo *European Center of Medium-Range Forecast*, permitiu concluir que existe uma boa coesão entre os dados do IPMA e ERA5 para as variáveis climáticas de temperatura, humidade relativa e radiação global. Em certas localizações a variável precipitação obteve resultados satisfatórios, mas em outras localizações não obteve, juntando-se às restantes variáveis que não obtiveram resultados satisfatórios, sendo a pressão

atmosférica, velocidade e direção do vento. A validação dos dados ERA5 foi efetuada provando que os dados são bons para serem utilizados para futuros estudos que pretendam caracterizar um clima exterior em território de Portugal continental, complementando os dados registados *in situ*, porém com cautelas para as variáveis climáticas precipitação, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento.

A correção dos erros de medição *in situ* para cada variável climática permitiu construir o ano de referência através de métodos para a construção do ficheiro climático *Moisture Reference Year*. Após uma revisão sobre que métodos a adotar, optou-se pelo método *Moisture Index* (MI) para selecionar o ano mais severo para cada localização entre os oito anos obtidos, criando-se o MRY.

O ficheiro climático criado foi introduzido no programa WUFI Plus, juntamente com o modelo geométrico desenhado em 3D, com o propósito de analisar a performance higrotérmica de um modelo computacional como teste aos efeitos de um clima exterior severo, representado por um *Moisture Reference Year*, sobre o ambiente interior do edifício modelo. As simulações foram efetuadas para três tipos diferentes de parede envolvente exterior, de forma constatando-se que para os três tipos de envolventes verticais o comportamento energético no interior foi semelhante na maioria das localizações relativamente à quantidade de energia necessária para atingir o conforto interior, querendo dizer que os resultados foram elevados para a maioria das localizações e soluções construtivas do elemento vertical.

Os resultados obtidos sobre as variações de temperatura e humidade relativa, bem como as necessidades de aquecimento e arrefecimento, apresentam valores expectáveis de encontrar para o ambiente interior quando exposto ao clima que foi construído baseado num MRY para o exterior de cada localização e para a solução construtiva adotada para cada caso de análise higrotérmica. Os resultados apresentam vastas horas fora dos intervalos de conforto térmico no ambiente interior, e elevados valores de necessidades energéticas para obtenção do conforto térmico para cada localização e cada tipo de envolvente vertical. Uma caracterização de Portugal continental, em que cada distrito foi representado por uma cidade adotada para estudo, foi efetuada sobre as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento, permitindo obter uma visão alargada do efeito do estudo higrotérmico com base num MRY criado com o método MI.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Ao longo do desenvolvimento do presente trabalho houve aspetos que não se abordaram, devido a alguns condicionalismos, mas que valeria a pena abordar no futuro. Os aspetos que faria sentido abordar como tema para futuras investigações serão referidos de seguida.

No presente trabalho criou-se um ficheiro climático *Moisture Reference Year* com base em duas fontes de bases de dados, IPMA e ERA5. Dado que, houve variáveis climáticas cujos valores de exatidão entre as duas fontes de dados apresentavam valores pouco satisfatórios, seria interessante para futuros trabalhos, construir um ficheiro MRY cujos erros de medição *in situ* fossem substituídos por valores capturados por outras estações meteorológicas próximas do local das estações utilizadas.

Efetuar comparações para as mesmas localizações escolhidas na presente dissertação, relativamente a outros métodos para criação de um *Moisture Reference Year*, de forma a identificar o que melhor se adequa.

O facto de a análise higrotérmica ter sido efetuada sobre um modelo cujas envolventes caracterizam as situações comuns de se encontrar nos edifícios construídos em Portugal, apresentam valores de necessidades de aquecimento e arrefecimento elevados, e imensas horas fora dos limites de temperatura de conforto. Seria interessante estudar a reabilitação higrotérmica do modelo computacional criado, utilizando o mesmo tipo de ficheiro climático.

BIBLIOGRAFIA

- [1] I. Vandemeulebroucke, S. Caluwaerts, e N. Van Den Bossche, «Decision framework to select moisture reference years for hygrothermal simulations», *Build Environ*, vol. 218, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109080.
- [2] J. Bilbao, A. Miguel, J. A. Franco, e A. Ayuso, «Test Reference Year Generation and Evaluation Methods in the Continental Mediterranean Area», *Journal of applied meteorology*, vol. 43, 2003.
- [3] S. Cornick, R. Djebbar, e W. Alan Dalglish, «Selecting moisture reference years using a Moisture Index approach», *Build Environ*, vol. 38, n. 12, pp. 1367–1379, 2003, doi: 10.1016/S0360-1323(03)00139-2.
- [4] D. Schwede e Y. Wang, «Reference weather datasets for building simulation in Vietnam considering thermal and hygrothermal characteristics», *Build Environ*, vol. 220, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109022.
- [5] Glossário climatologia/meteorologia, «https://www.ipma.pt/pt/educativa/glossario/meteorologico/index.jsp?page=glossario_ef.xml&print=true».
- [6] F. Branski, «Pioneering the collection and exchange of meteorological data», *WMO Bulletin* 59(1), 2010.
- [7] M. Herrera, S. Natarajan, D. A. Coley, T. Kershaw, e A. P. Ramallo-González, «A review of current and future weather data for building simulation», *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 38, n. 5, pp. 602–627, Set. 2017, doi: 10.1177/0143624417705937.
- [8] G. Pernigotto, A. Prada, D. Cóstola, A. Gasparella, e J. L. M. Hensen, «Multi-year and reference year weather data for building energy labelling in north Italy climates», *Energy Build*, vol. 72, pp. 62–72, Abr. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.12.012.
- [9] T. Kalamees e J. Vinha, «Estonian Climate Analysis for Selecting Moisture Reference Years for Hygrothermal Calculations», *J Build Phys*, vol. 27, n. 3, pp. 199–220, 2004, doi: 10.1177/1097196304038839.
- [10] European committee for standardization (CEN) e EN ISO 15927-4, «Hygrothermal performance of buildings-Calculation and presentation of climatic data-Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling», 2005
- [11] European committee for standardization (CEN) e EN 15026, «Hygrothermal performance of building components and building elements-Assessment of moisture transfer by numerical simulation», Abril de 2007
- [12] S. Erba, F. Causone, e R. Armani, «The effect of weather datasets on building energy simulation outputs», em *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 545–554. doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.561.
- [13] I. A. Al-Mofeez, M. Y. Numan, K. A. Alshaibani, e F. A. Al-Maziad, «Review of typical vs. synthesized energy modeling weather files», em *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Jan. 2012. doi: 10.1063/1.3672191.
- [14] F. M. A. Henriques, *Comportamento higrotérmico de edifícios*, 11.7. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2019.
- [15] C. Aggarwal, H. Ge, M. Defo, e M. A. Lacasse, «Reliability of Moisture Reference Year (MRY) selection methods for hygrothermal performance analysis of wood-frame walls under historical and future climates», *Build Environ*, vol. 207, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108513.
- [16] A. Machard, C. Inard, J. M. Alessandrini, C. Pelé, e J. Ribéron, «A Methodology for Assembling Future Weather Files including Heatwaves for Building Thermal Simulations from the European Coordinated Regional Downscaling Experiment (EURO-CORDEX) Climate Data», *Energies (Basel)*, vol. 13, n. 13, Jul. 2020, doi: 10.3390/en13133424.
- [17] O. Yaqubi, A. Rodler, S. Guernouti, e M. Musy, «Creation and application of future typical weather files in the evaluation of indoor overheating in free-floating buildings», *Build Environ*, vol. 216, Mai. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109059.

- [18] G. Ouzeau, J. M. Soubeyroux, M. Schneider, R. Vautard, e S. Planton, «Heat waves analysis over France in present and future climate: Application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble», *Clim Serv*, vol. 4, pp. 1–12, Dez. 2016, doi: 10.1016/j.cliser.2016.09.002.
- [19] S. Janjai e P. Deeyai, «Comparison of methods for generating typical meteorological year using meteorological data from a tropical environment», *Appl Energy*, vol. 86, n. 4, pp. 528–537, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2008.08.008.
- [20] E. Barreira, M. L. Simões, J. M. P. Q. Delgado, e I. Sousa, «Procedures in the construction of a test reference year for Porto-Portugal and implications for hygrothermal simulation», *Sustain Cities Soc*, vol. 32, pp. 397–410, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.scs.2017.04.013.
- [21] C. Rode, *Persistence Reference Years for Moisture Calculations*. Dinamarca: Danish Building Research Institute, 1994.
- [22] S. Kim, D. Zirkelbach, e H. M. Künzeli, «Review of Methods to Create Meteorological Data Suitable for Moisture Control Design by Hygrothermal Building Envelope Simulation», *Energies (Basel)*, vol. 16, n. 7, p. 3271, Abr. 2023, doi: 10.3390/en16073271.
- [23] X. Zhou, D. Derome, e J. Carmeliet, «Robust moisture reference year methodology for hygrothermal simulations», *Build Environ*, vol. 110, pp. 23–35, Dez. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.09.021.
- [24] A. Tenwolde, «ASHRAE Standard 160P - Criteria for Moisture Control Design Analysis in Buildings», 2008.
- [25] A. Hukka e H. A. Viitanen, «A mathematical model of mould growth on wooden material», *Wood Sci Technol*, vol. 33, 1999.
- [26] X. Zhou, D. Derome, e J. Carmeliet, «Ein neues Verfahren zur Auswahl von Feuchte-Referenzjahren für hygrothermische Simulationen», *Bauphysik*, vol. 38, n. 6, pp. 361–365, Dez. 2016, doi: 10.1002/bapi.201610042.
- [27] V. M. Nik, «Making energy simulation easier for future climate - Synthesizing typical and extreme weather data sets out of regional climate models (RCMs)», *Appl Energy*, vol. 177, pp. 204–226, Set. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.05.107.
- [28] Historical Weather, «<https://open-meteo.com/en/docs/historical-weather-api>».
- [29] G. B. A. Coelho, H. E. Silva, e F. M. A. Henriques, «Calibrated hygrothermal simulation models for historical buildings», *Build Environ*, vol. 142, pp. 439–450, Set. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.06.034.
- [30] N. K. Friis, E. B. Møller, e T. Lading, «Hygrothermal assessment of external walls in Arctic climates: Field measurements and simulations of a test facility», *Build Environ*, vol. 238, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110347.
- [31] N. K. Friis, E. B. Møller, e T. Lading, «Hygrothermal conditions in the facades of residential buildings in Nuuk and Sisimiut», *Build Environ*, vol. 243, Set. 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110686.
- [32] A. Arndt, D. Scherer, e C. Schneider, «Atmosphere driven mass-balance sensitivity of Halji glacier, Himalayas», *Atmosphere (Basel)*, vol. 12, n. 4, Abr. 2021, doi: 10.3390/atmos12040426.
- [33] D. Bujak, G. Lončar, D. Carević, e T. Kulić, «The Feasibility of the ERA5 Forced Numerical Wave Model in Fetch-Limited Basins», *J Mar Sci Eng*, vol. 11, n. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/jmse11010059.
- [34] P. Choidis, D. Kraniotis, I. Lehtonen, e B. Hellum, «A modelling approach for the assessment of climate change impact on the fungal colonization of historic timber structures», *Forests*, vol. 12, n. 7, Jul. 2021, doi: 10.3390/f12070819.
- [35] E. B. Møller e J. Helgason, «Weather and indoor climate in Greenland», em *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Dez. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/2069/1/012073.
- [36] X. Wu, J. Su, W. Ren, H. Lü, e F. Yuan, «Statistical comparison and hydrological utility evaluation of ERA5-Land and IMERG precipitation products on the Tibetan Plateau», *J Hydrol (Amst)*, vol. 620, Mai. 2023, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.129384.

- [37] H. Chen, B. Yong, P. E. Kirstetter, L. Wang, e Y. Hong, «Global component analysis of errors in three satellite-only global precipitation estimates», *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 25, n. 6, pp. 3087–3104, Jun. 2021, doi: 10.5194/hess-25-3087-2021.
- [38] G. Gualtieri, «Reliability of era5 reanalysis data for wind resource assessment: A comparison against tall towers», *Energies (Basel)*, vol. 14, n. 14, Jul. 2021, doi: 10.3390/en14144169.
- [39] E. Dyukarev, «Comparison of Artificial Neural Network and Regression Models for Filling Temporal Gaps of Meteorological Variables Time Series», *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, n. 4, Fev. 2023, doi: 10.3390/app13042646.
- [40] G. B. A. Coelho e D. Kraniotis, «A multistep approach for the hygrothermal assessment of a hybrid timber and aluminium based facade system exposed to different sub-climates in Norway», *Energy Build*, vol. 296, Out. 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113368.
- [41] S. Cornick e W. Alan Dalglish, «A moisture Index to Characterize Climates for Building Envelope Design», *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, vol. 27, n. 2, pp. 151–178, Out. 2003, doi: 10.1177/109719603036210.
- [42] S. Cornick, A. Dalglish, N. Said, R. Djebbar, F. Tariku, e M. K. Kumaran, «Report from Task 4 of MEWS Project Task 4-Environmental Conditions Final Report», Ottawa, 2002.
- [43] D. Zirkelbach, T. Schmidt, M. Kehrer, e H. M. Künzle, *WUFI ® Pro 5 Manual*. Franhofer IBP.
- [44] L. G. Baltazar e J. Tapadas, «A Modelling Tool for Lighting Systems Based on Visual Comfort and Energy Consumption—Case Study of a Residential Building. In Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering.», *Springer Tracts in Civil Engineering*, 2023.
- [45] J. P. Gouveia, P. B. Lourenço, e G. Vasconcelos, «Congresso Construção 2007-3.º Congresso Nacional».
- [46] R. Sousa, F. da Silva, F. Sousa, e H. de Sousa, *Fachadas de edifícios*, 1.º. Lisboa: Lidel, 2016.
- [47] M. Sousa, C. Oliveira, e A. Costa, «Caracterização do parque habitacional de Portugal Continental para estudos de risco sísmico», *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, vol. 55, 2006.
- [48] C. Pereira, «Reabilitação de Edifícios “Gaioleiros”», Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.
- [49] C. Santos e R. Rodrigues, «ITE 54 - Coeficientes de transmissão térmica de elementos opacos da envolvente dos edifícios: Soluções construtivas de edifícios antigos, Soluções construtivas das Regiões Autónomas», ISBN 978-972-49-2180-8, 2012
- [50] G. Coelho, «Análise do comportamento higratérmico em regime variável de paredes sujeitas à acção da chuva incidentado», Lisboa, 2015.
- [51] C. Santos e L. Matias, «ITE 50 - Coeficientes de térmica de elementos da envolvente dos edifícios», ISBN 978-972-49-2065-8, 2014
- [52] L. Silva, A. Martins, G. Vasconcelos, e P. Lourenço, «Paredes de Alvenaria de Fachada: Soluções e sugestões de melhorias construtivas», em *Seminário Reabilitação de Fachadas*, Guimarães: Universidade do Minho, 2016.
- [53] D. Aelenei, «REH Light - Manual de apoio à aplicação da regulamentação referente ao comportamento térmico de edifícios de habitação», 2016
- [54] H. E. Huerto-Cardenas *et al.*, «Validation of dynamic hygrothermal simulation models for historical buildings: State of the art, research challenges and recommendations», *Building and Environment*, vol. 180. Elsevier Ltd, 1 de Agosto de 2020. doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107081.
- [55] G. R. Ruiz e C. F. Bandera, «Validation of calibrated energy models: Common errors», *Energies (Basel)*, vol. 10, n. 10, Out. 2017, doi: 10.3390/en10101587.
- [56] D. Chakraborty e H. Elzarka, «Performance testing of energy models: are we using the right statistical metrics?», *J Build Perform Simul*, vol. 11, n. 4, pp. 433–448, Jul. 2018, doi: 10.1080/19401493.2017.1387607.

Anexos

A. Validação das variáveis climáticas

No presente anexo optou-se por apresentar apenas duas variáveis climáticas pois os gráficos linhas gerados para o presente trabalho foram de tal ordem que apresentando tudo neste capítulo tornaria a apresentação maçadora para o leitor. Posto isto, serão apresentados gráficos de linha referentes à variável temperatura por ter sido a variável com maior taxa de sucesso na validação, e a velocidade do vento por ter sido a variável climática que apresentava muitos erros de medição e por ter tido maior taxa de insucesso na validação.

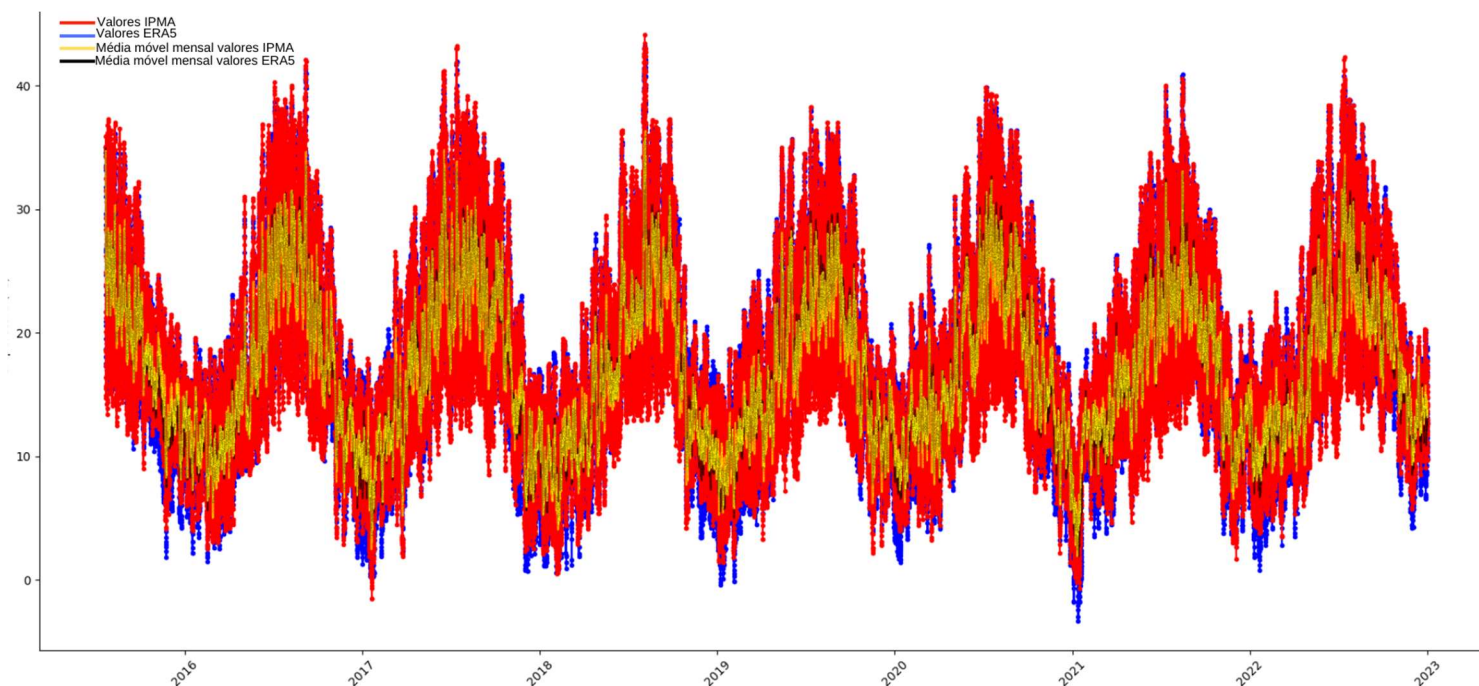


Figura Anexo A 1 - Localização de Beja. Comparação de dados medidos com simulados para a variável climática, Temperatura (°C).

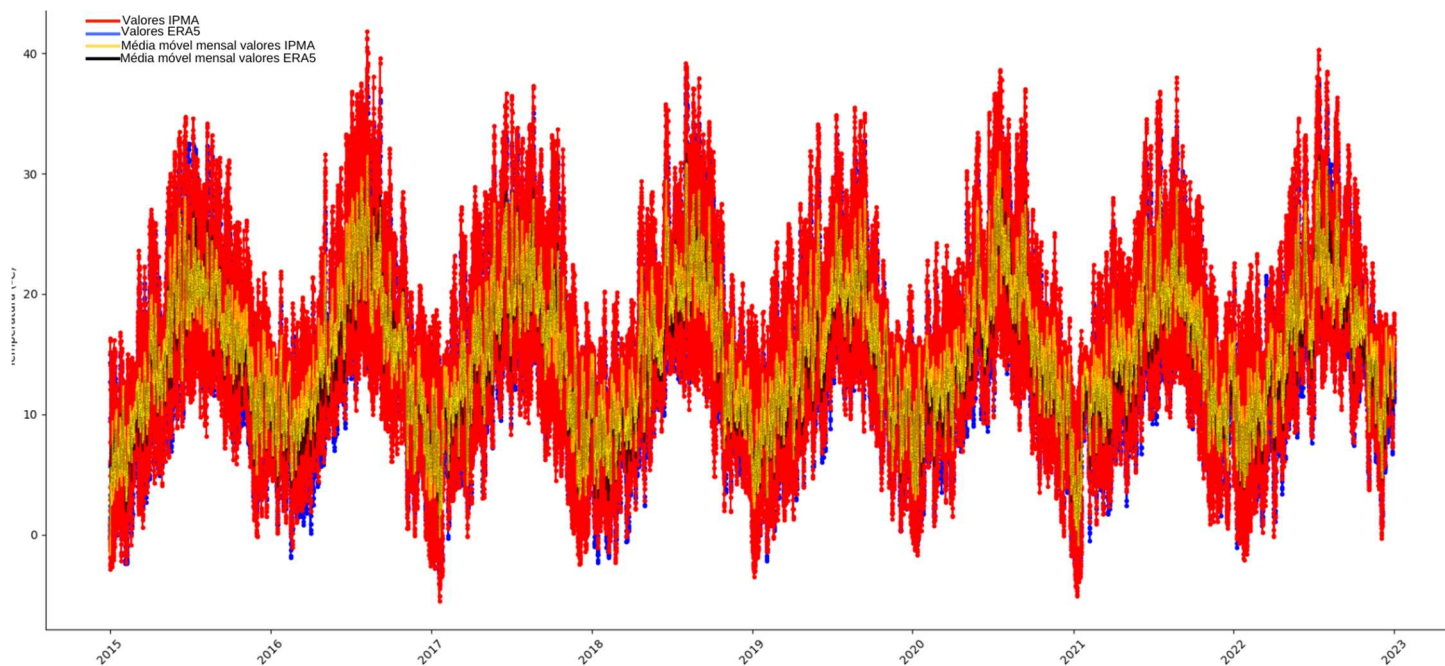


Figura Anexo A 2 - Localização de Braga. Comparação de dados medidos com simulados para a variável climática, Temperatura (°C).

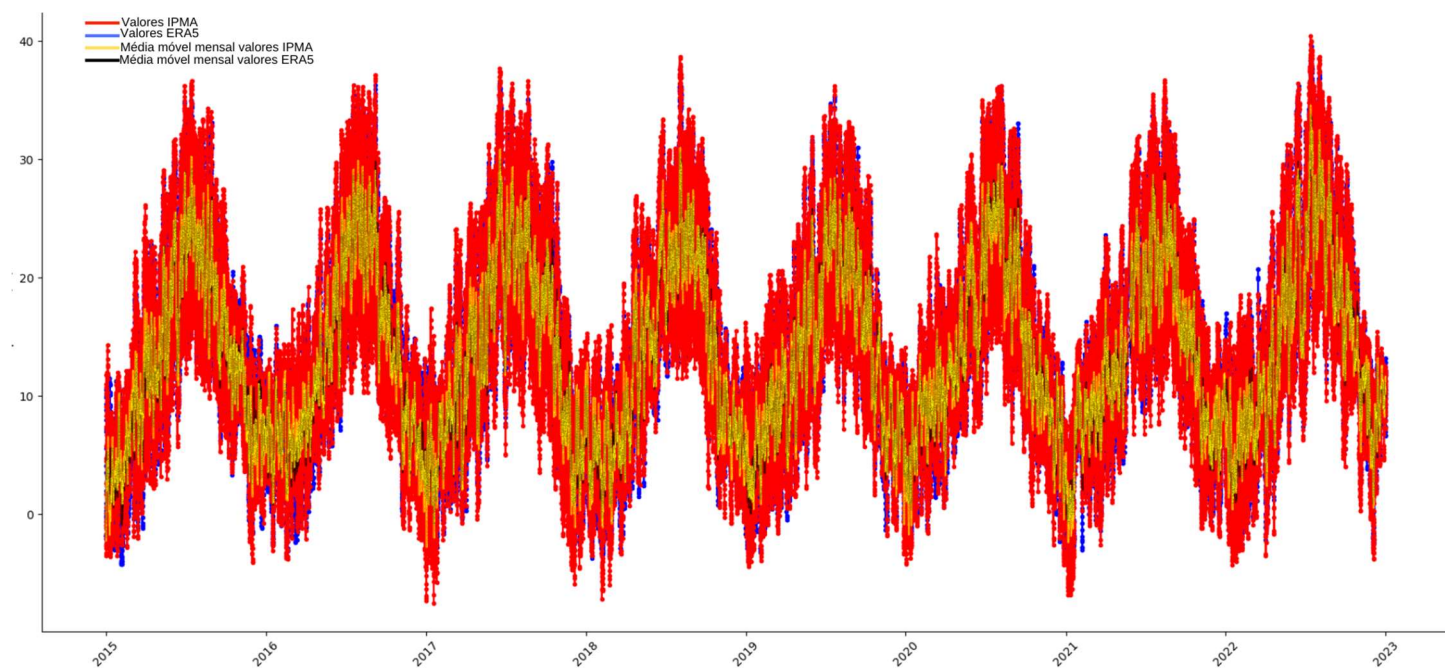


Figura Anexo A 3 - Localização de Bragança. Comparação de dados medidos com simulados para a variável climática Temperatura (°C).

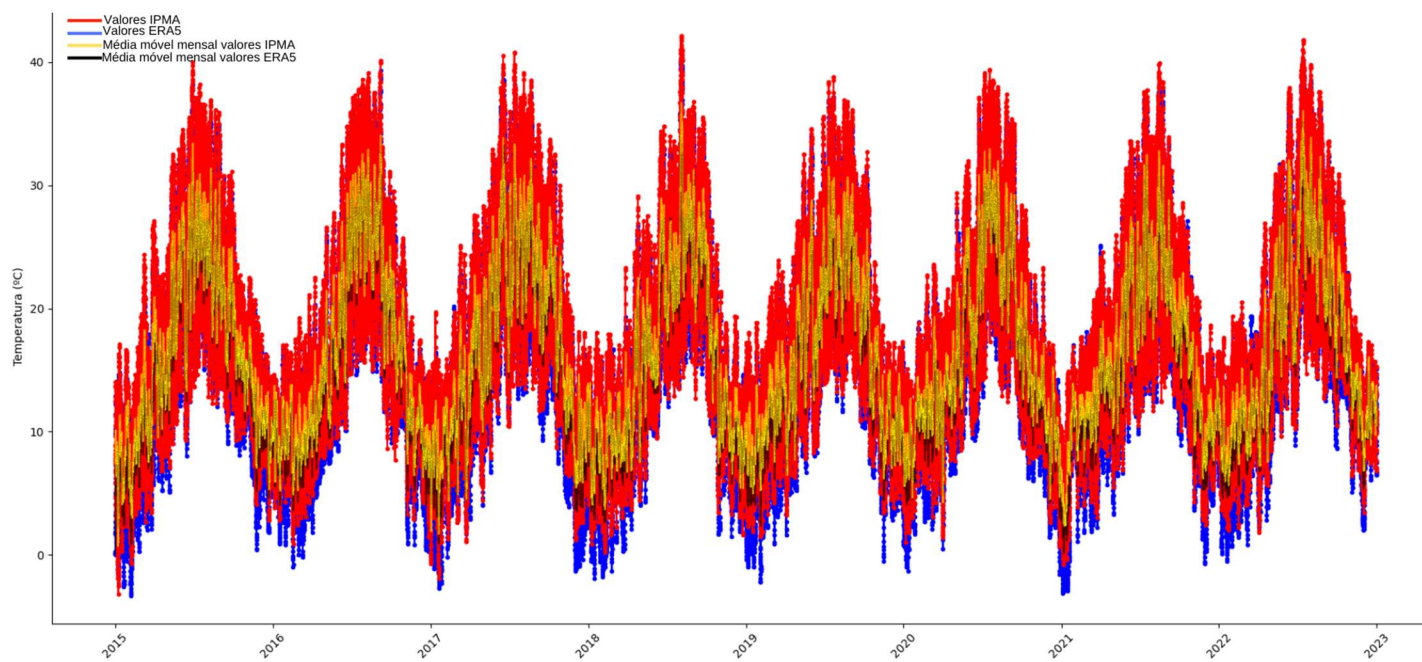


Figura Anexo A 4 - Localização de Castelo Branco. Comparação de dados medidos com simulados para a variável climática, Temperatura (°C).

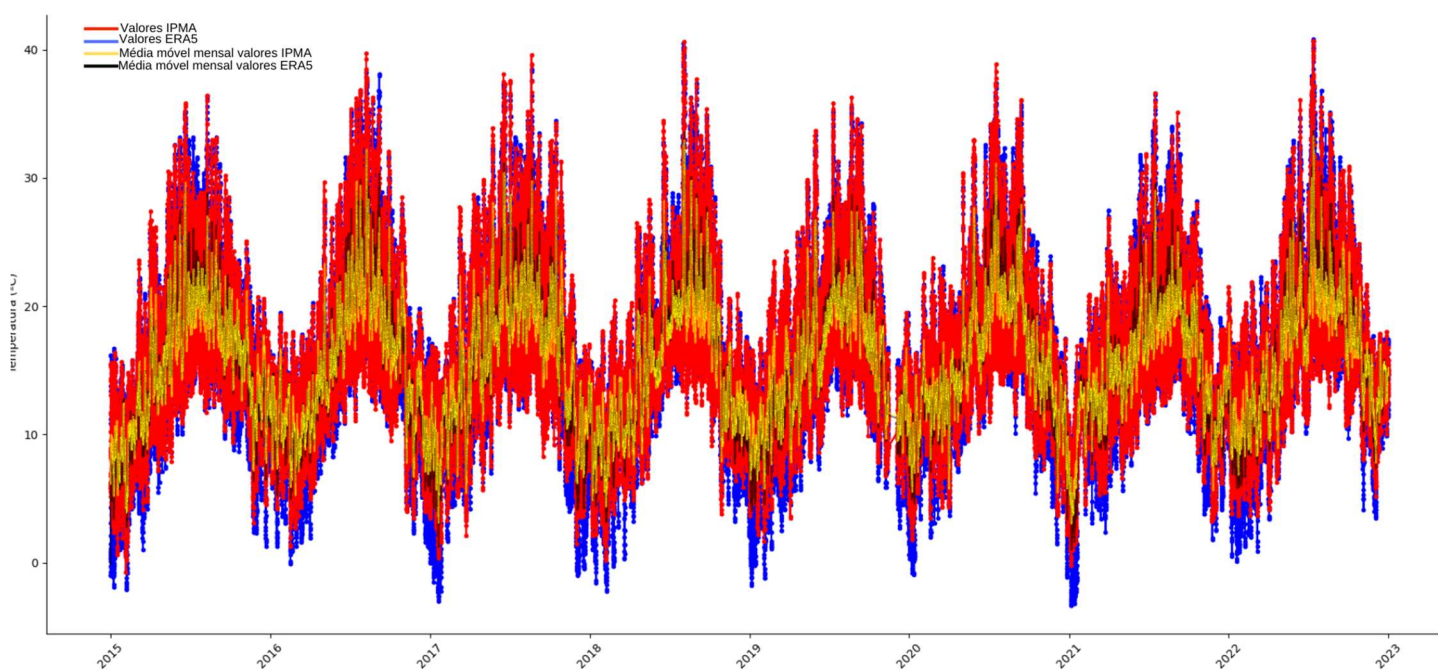


Figura Anexo A 5 - Localização de Coimbra. Comparação de dados medidos com simulados para a variável climática Temperatura (°C).

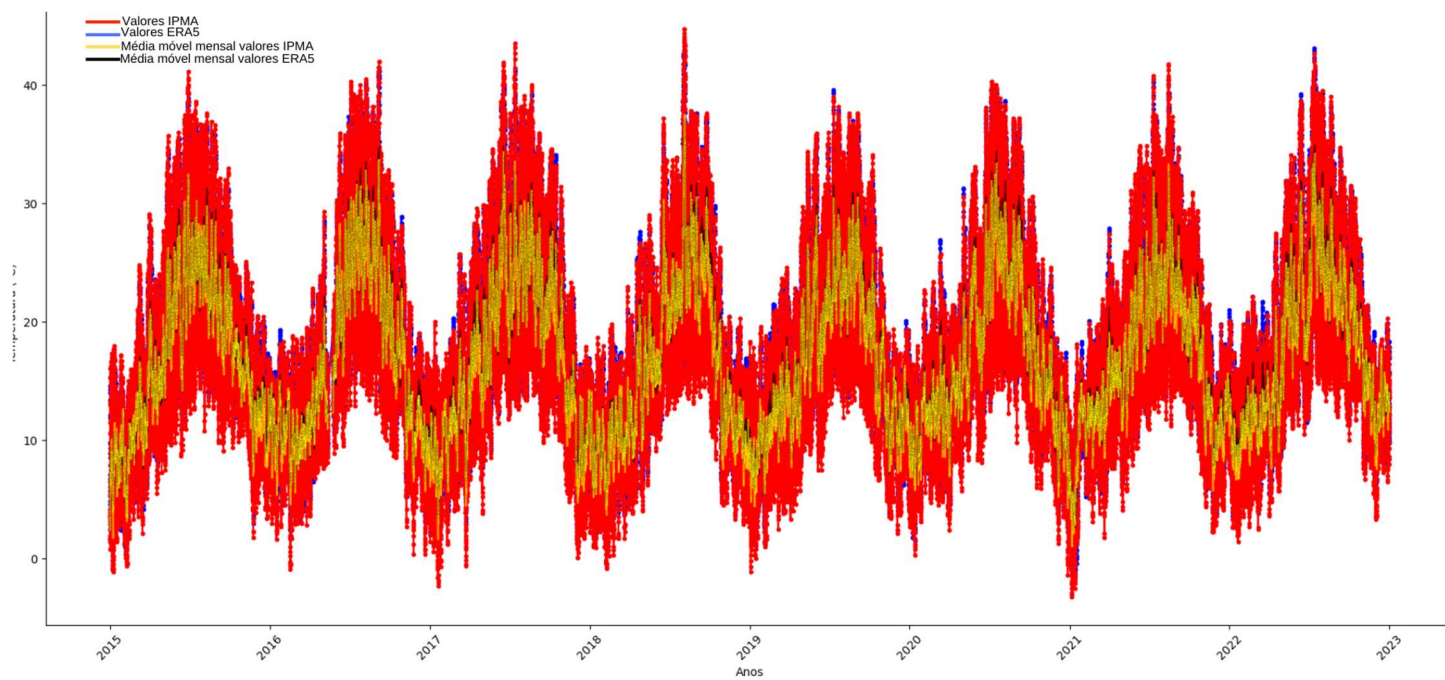


Figura Anexo A 6 - Localização de Évora. Comparação de dados medidos com simulados para a variável climática, Temperatura (°C).

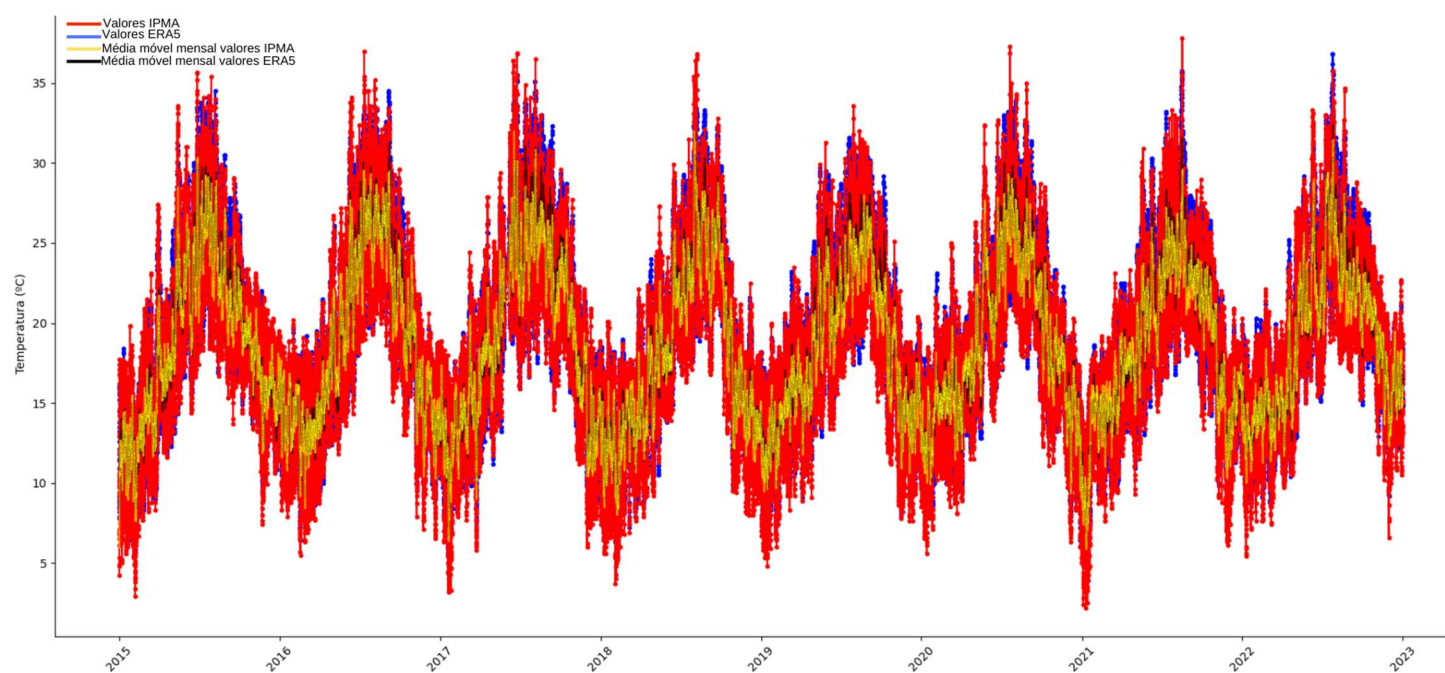


Figura Anexo A 7 - Localização de Faro. Comparação de dados medidos com simulados para a variável climática, Temperatura (°C).

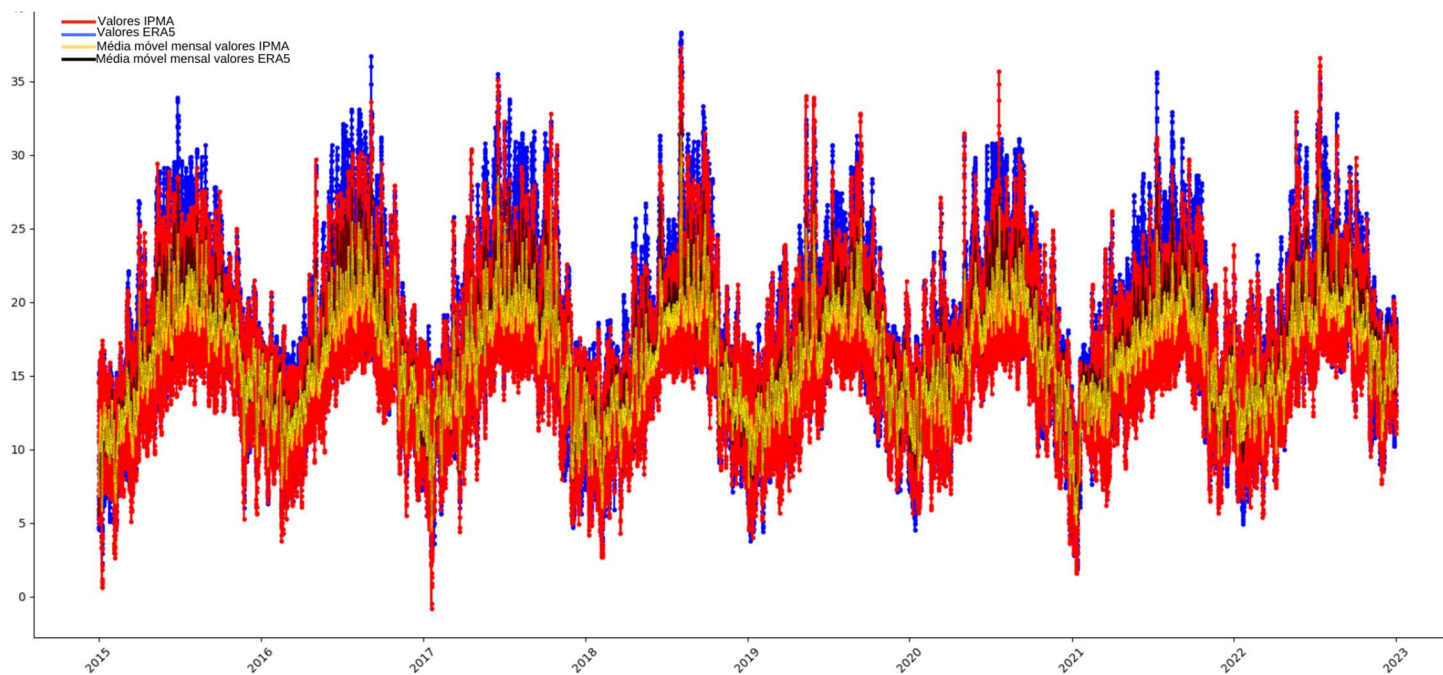


Figura Anexo A 8 - Localização de Sines. Comparação de dados medidos com simulados para a variável climática Temperatura (°C).

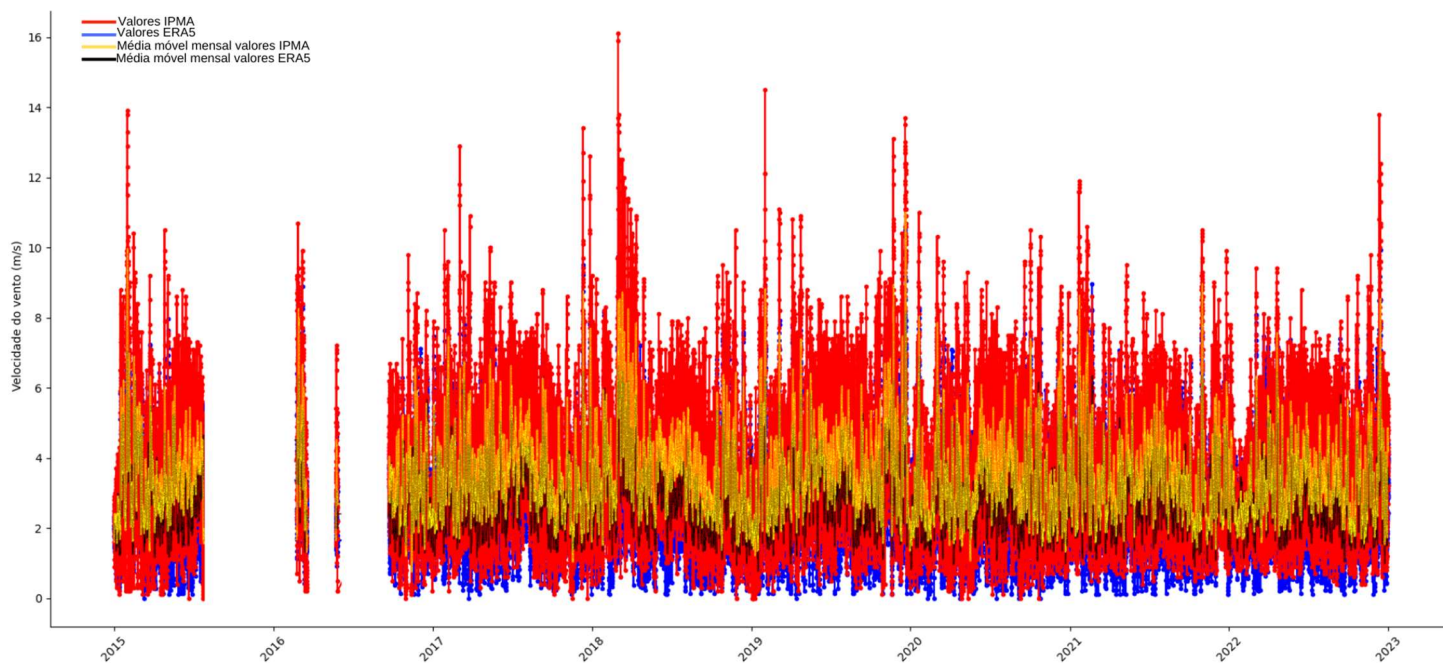


Figura Anexo A 9 - Localização de Beja. Comparação de dados medidos com simulados para a variável climática, Velocidade do vento (m/s). Azul - Dados ERA5; Vermelho - Dados IPMA; Amarelo - Média Móvel Mensal IPMA; Preto - Média Movel Mensal ERA5.

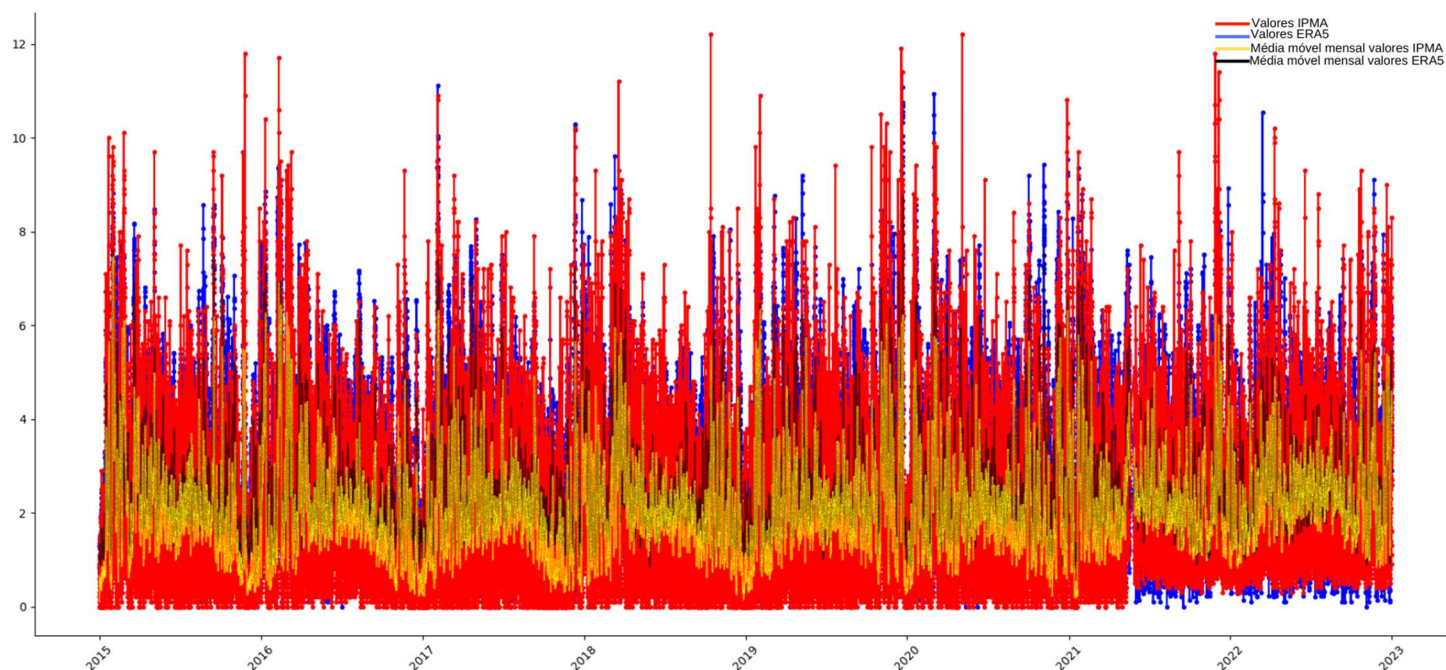


Figura Anexo A 10 - Localização de Bragança. Comparação de dados medidos com simulados para a variável climática, Velocidade do vento (m/s).

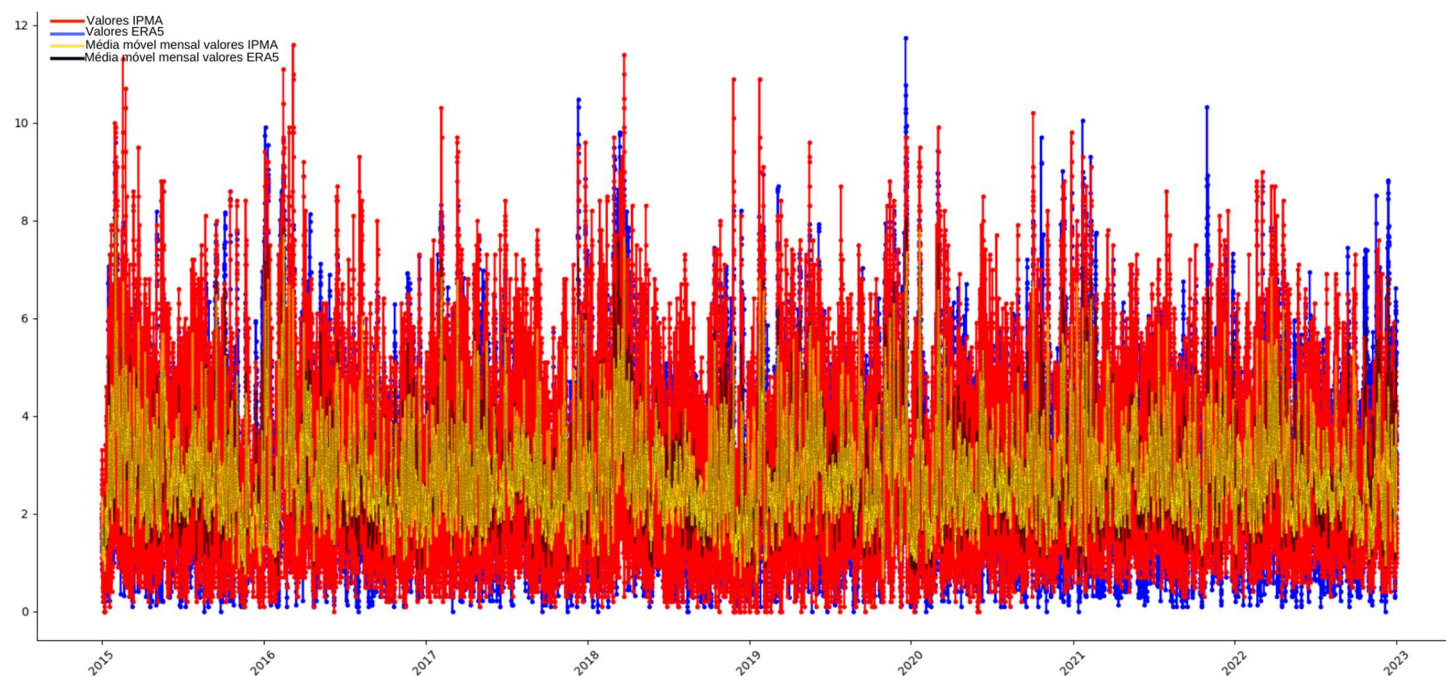


Figura Anexo A 11- Localização de Castelo Branco. Comparação de dados medidos com simulados para a variável climática, Velocidade do vento (m/s).

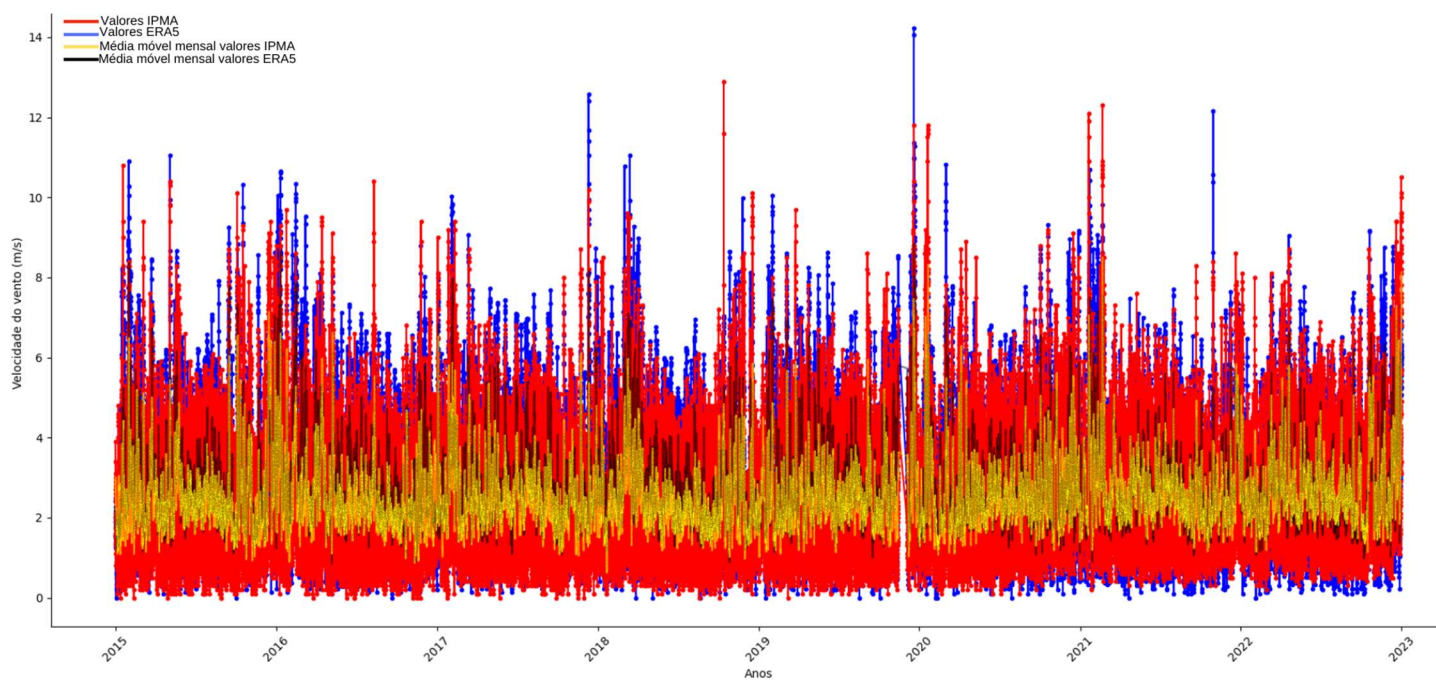


Figura Anexo A 12 - Localização de Coimbra. Comparação de dados medidos com simulados para a variável climática, Velocidade do vento (m/s).

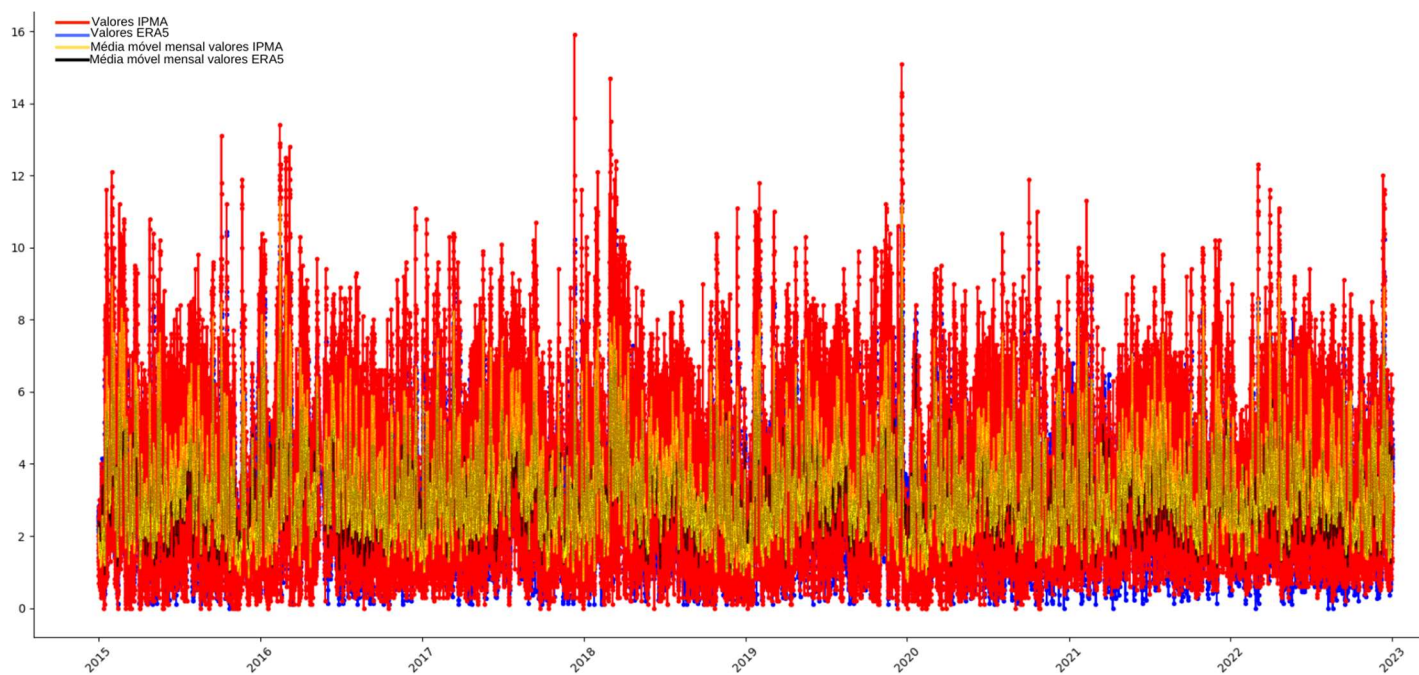


Figura Anexo A 13 - Localização de Évora. Comparação de dados medidos com simulados para a variável climática, Velocidade do vento (m/s).

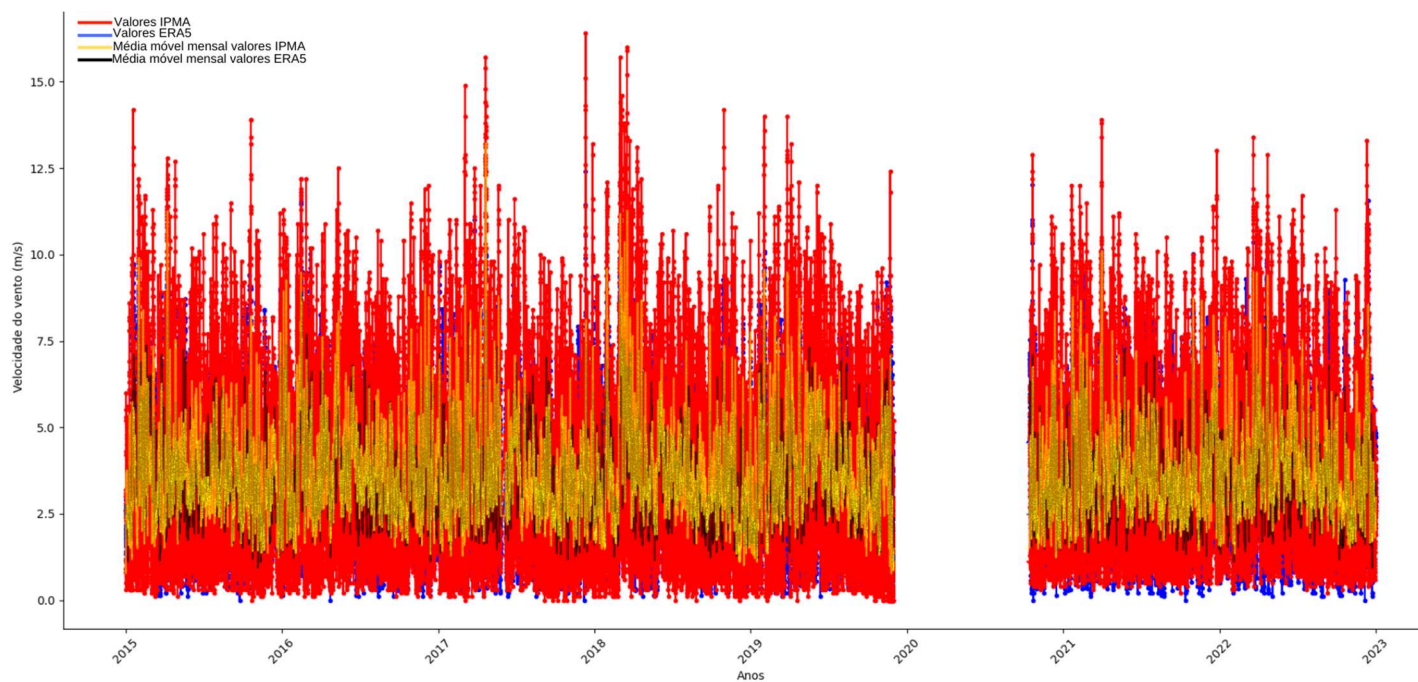


Figura Anexo A 14 - Localização de Faro. Comparação de dados medidos com simulados para a variável climática, Velocidade do vento (m/s).

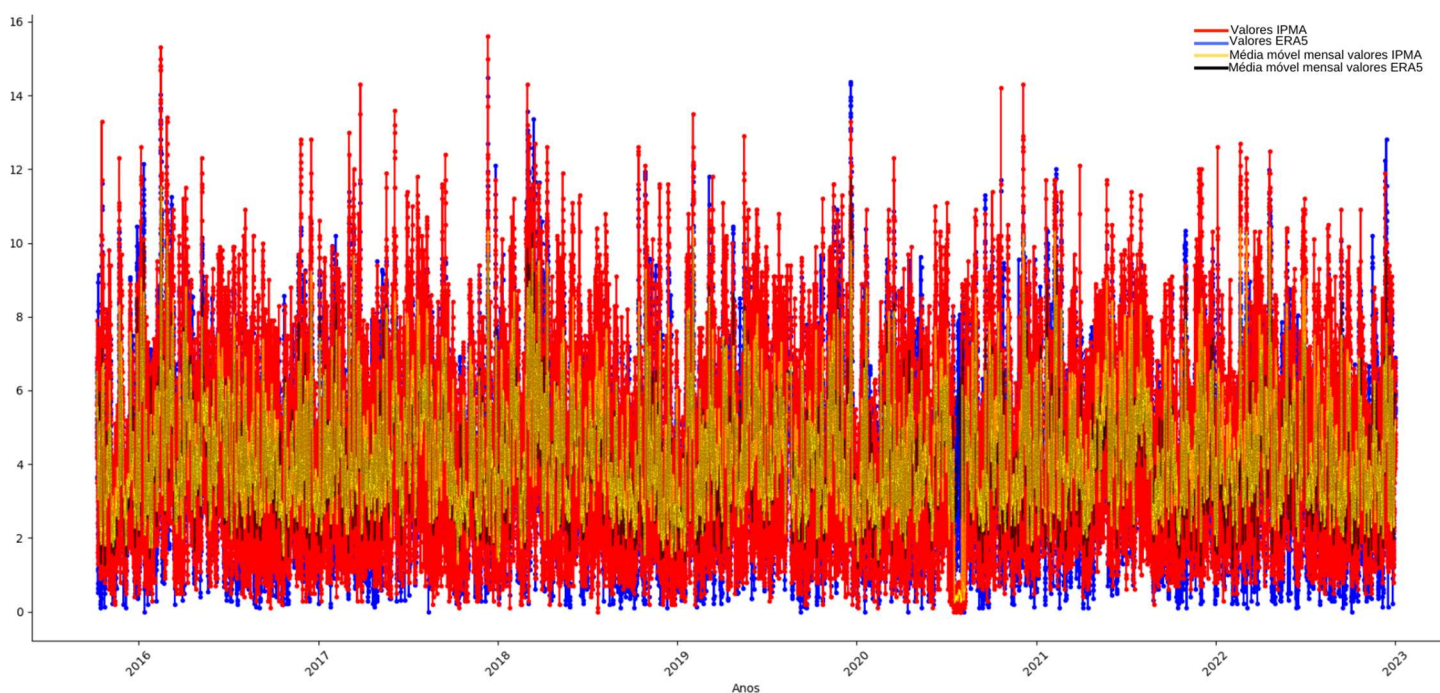


Figura Anexo A 15 - Localização de Sines. Comparação de dados medidos com simulados para a variável climática, Velocidade do vento (m/s).

Nota do autor: As restantes localizações apresentam gráficos de linhas semelhantes aos já apresentados em anexo e no corpo de texto do trabalho da dissertação. Posto isto, para não densificar em demasia a apresentação, o autor do presente trabalho optou por prescindir de demonstrar os restantes gráficos de linhas.

B. Validação dos valores simulados para as variáveis climáticas através de índices de exatidão

Tabela Anexo B 1 - Resultados dos índices de exatidão estatística para a comparação entre os valores das variáveis climáticas medidas (IPMA) com simuladas (ERA5). T – Temperatura, HR – Humidade relativa, Patm – Pressão atmosférica, Vel.Vento – velocidade do vento, Dir.Vento – Direção do vento, RG – Radiação global.

Localizações	Índice	Variável climática						
		T	HR	Patm	Precipitação	Vel. Vento	Dir.Vento	RG
Aveiro	R ²	0,85	0,54	0,88	0,19	0,19	0,2	0,92
	RN_RMSE	5,91%	12,75%	4,47%	2,05%	10,32%	35,31%	7,04%
	MBE	-0,008	0,019	0,002	0,0211	-0,284	-0,025	-0,027
Beja	R ²	0,96	0,81	0,3233	0,233	0,21	0,41	0,94
	RN_RMSE	3,22%	10,62%	55,45%	1,59%	7,46%	23,39%	6,46%
	MBE	-0,011	0,075	0,033	0,187	0,234	0,027	0,023
Braga	R ²	0,9	0,63	0,00	0,19	0,19	0,2	0,92
	RN_RMSE	4,39%	11,20%	0,00	2,71%	15,38%	33,74%	6,31%
	MBE	0,052	0,014	0,00	-0,405	-0,406	0,073	-0,011
Bragança	R ²	0,951	0,794	0,00	0,15	0,2	0,552	0,92
	RN_RMSE	3,68%	10,68%	100,00%	1,58%	10,79%	36,42%	6,53%
	MBE	0,002	-0,045	0,082	-0,142	-0,189	0,108	0,017
Castelo Branco	R ²	0,93	0,74	0,65	0,01	0,52	0,22	0,92
	RN_RMSE	4,29%	12,28%	73,57%	1,73%	8,51%	25,94%	6,47%
	MBE	0,072	-0,057	0,049	0,159	-0,001	-0,053	-0,005
Coimbra	R ²	0,96	0,02	0,19	0,95	0,53	0,08	0,92
	RN_RMSE	4,87%	19,84%	16,67%	1,75%	8,40%	29,50%	6,65%
	MBE	-0,011	-0,026	0,011	0,062	-0,122	-0,064	-0,024
Évora	R ²	0,96	0,8	0,29	0,01	0,35	0,22	0,93
	RN_RMSE	3,05%	11,26%	52,33%	1,58%	7,11%	27,21%	6,82%
	MBE	-0,028	0,096	0,061	0,096	0,096	0,014	-0,011
Faro	R ²	0,93	0,65	0,70	0,02	0,14	0,09	0,94
	RN_RMSE	3,99%	10,99%	5,51%	1,79%	11,36%	31,69%	6,71%
	MBE	-0,01	-0,003	0,002	-0,007	0,075	-0,049	0,038
Guarda	R ²	0,45	0,63	0,00	0,01	0,03	0,41	0,88
	RN_RMSE	11,83%	14,83%	0,00	1,64%	12,75%	37,49%	8,56%
	MBE	0,415	-0,030	0,00	-0,462	-0,169	0,203	0,051
Leiria	R ²	0,74	0,53	0,54	0,01	0,82	0,04	0,91
	RN_RMSE	4,73%	10,57%	9,40%	1,95%	24,39%	33,64%	7,59%
	MBE	-0,03	-0,072	0,038	0,066	-0,527	0,030	-0,081
Lisboa	R ²	0,92	0,58	0,06	0,04	0,17	0,59	0,87
	RN_RMSE	3,36%	11,34%	9,35%	0,83%	17,29%	39,10%	9,57%
	MBE	0,033	-0,059	0,005	0,406	-0,248	0,068	-0,126
Portalegre	R ²	0,89	0,55	0,013	0,09	0,45	0,01	0,92
	RN_RMSE	5,97%	16,52%	89,88%	2,34%	12,64%	29,15%	6,24%
	MBE	-0,009	-0,027	0,054	0,488	0,274	0,079	-0,019
Santarém	R ²	0,95	0,84	0,04	0,81	0,24	0,30	0,93
	RN_RMSE	2,81%	8,99%	28,21%	2,50%	11,01%	25,75%	6,51%
	MBE	0,019	0,038	0,012	0,015	-0,281	-0,0436	-0,02

Sines	R ²	0,90	0,61	0,10	0,01	0,58	0,04	0,94
	RN_RMSE	3,96%	11,34%	9,33%	1,80%	8,12%	31,54%	6,10%
	MBE	-0,042	0,055	0,005	-0,063	0,033	0,003	0,012
Viana do Castelo	R ²	0,88	0,54	0,76	0,49	0,45	0,24	0,93
	RN_RMSE	4,28%	9,11%	4,82%	2,26%	25,20%	33,65%	6,59%
	MBE	-0,038	0,026	0,001	-0,052	-0,456	-0,083	-0,052
Vila Real	R ²	0,95	0,72	0,76	0,10	0,03	0,37	0,98
	RN_RMSE	3,32%	11,59%	78,22%	1,55%	10,28%	30,71%	6,70%
	MBE	0,003	-0,062	0,056	-0,291	-0,251	-0,173	-0,021
Viseu	R ²	0,92	0,65	0,73	0,15	0,01	0,19	0,00
	RN_RMSE	4,56%	13,08%	80,15%	2,03%	13,01%	27,01%	0,00
	MBE	0,038	-0,014	0,053	0,008	0,561	0,068	0,00

C. AUTODESK REVIT para WUFI Plus

O formato necessário para ser introduzido no programa WUFI Plus deve ser realizado da seguinte forma:

- 1º Passo – Desenhe o modelo 3D. Desenhe toda a envolvente e vãos envidraçados e as divisões interiores do seu projeto de arquitetura.
- 2º Passo - No separador “Architecture” clique em “Rooms” e defina os vários espaços interiores do seu modelo.
- 3º Passo – No separador “Analyze” clique em “Spaces” e defina todos os espaços interiores para análise.
- 4º Passo – No separador “Analyze” em “Spaces & Zones” selecione “Area and Volume computations” e defina para calcular todas as áreas e volumes do modelo, confinando o cálculo às paredes interiores das divisões inferiores e respetivo pé direito, seleccionando em “computations” → “Areas and volumes” → “At wall finish”. Deste modo quando definir o modelo 3D analítico, ficará com todos os volumes e áreas calculados para os espaços e divisões definidos.

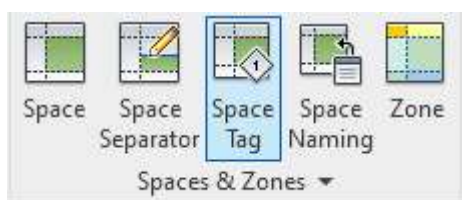


Figura Anexo C 1-Seleção de “spaces & zones”. Capturado do programa Autodesk Revit.

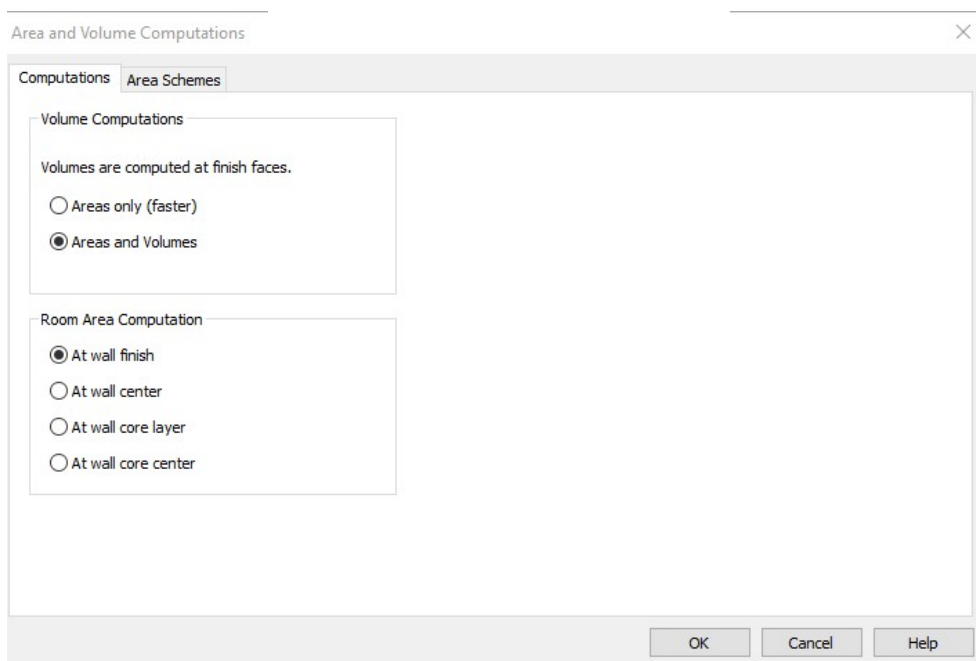


Figura Anexo C 2-Seleção do cálculo de áreas e volumes confinados ao acabamento das envolventes das divisões interiores. Capturo do programa Autodesk Revit.

- 5º Passo – No separador “Analyze” selecione “Create Energy Model” e crie o modelo 3D analítico.
- 6º Passo – No separador “File” selecione “Export” → “gbXML”

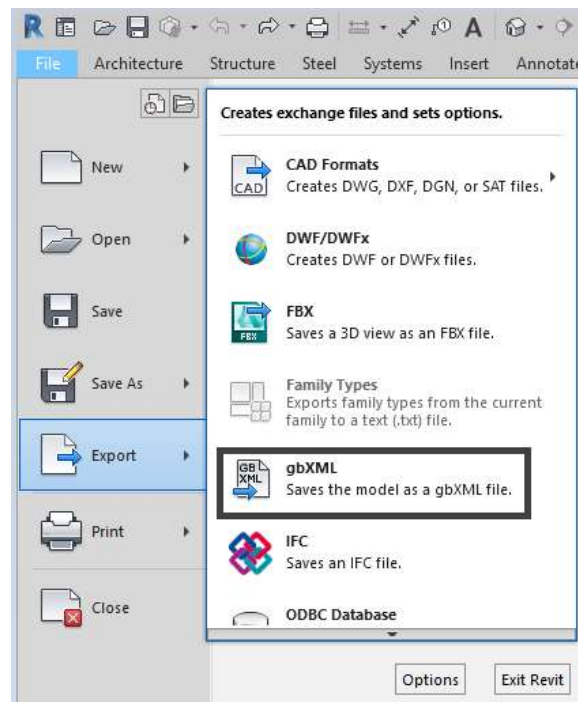


Figura Anexo C 3- Demonstração do separador por onde extrair o modelo 3D num ficheiro adaptado para ser inserido no WUFI Plus. Capturado do programa Autodesk Revit.

- 7º Passo – Após seleccionar “gbXML”, aparecerá uma janela com a opção de transferir o modelo 3D analítico com base em definições energéticas ou com valores dos volumes dos espaços e divisões. Seleccionará “*Use Rooms/Spaces Volumes*”.
- 8º Passo – Após seleccionar o indicado no passo interior, clique em “*Save settings*” e salvará o ficheiro em formato gbXML pronto a ser introduzido no programa WUFI Plus.
- 9º Passo – No seu computador, no local onde instalou o programa WUFI Plus encontrará um adaptador de ficheiro com formato gbXML para gbXML_WUFIproject, com a seguinte direcção WUFI → Tools → Plus_gbXML. Após esta adaptação o modelo 3D poderá ser interpretado pelo WUFI Plus.

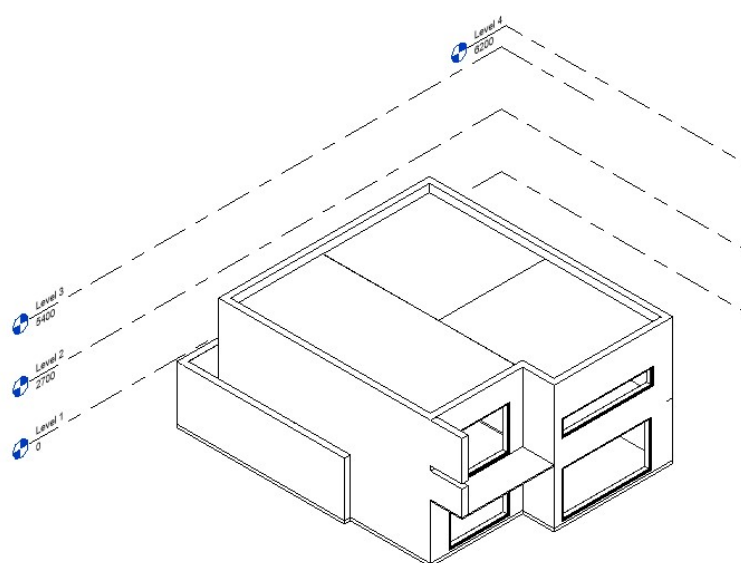


Figura Anexo C 4 - Modelo 3D, desenhado a partir das dimensões do projeto de arquitetura. Capturado do programa Autodesk Revit.

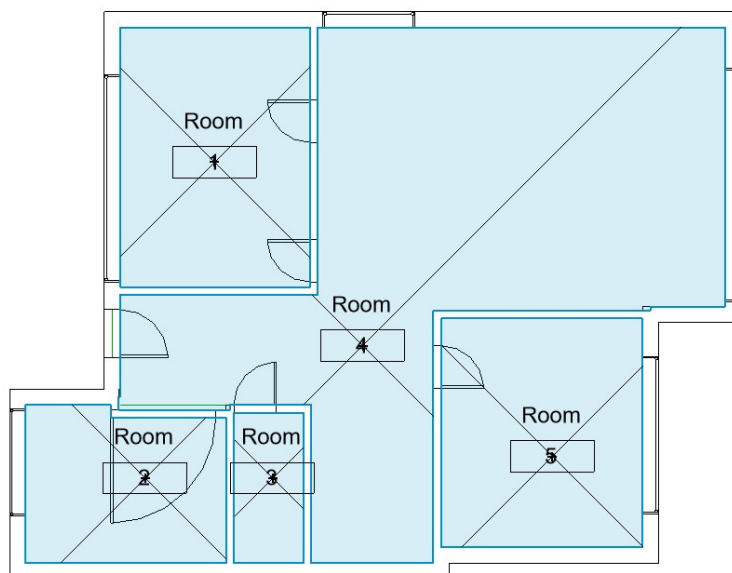


Figura Anexo C 5-Definição dos “Rooms” para definição das divisões interiores. Capturado do programa Autodesk Revit.

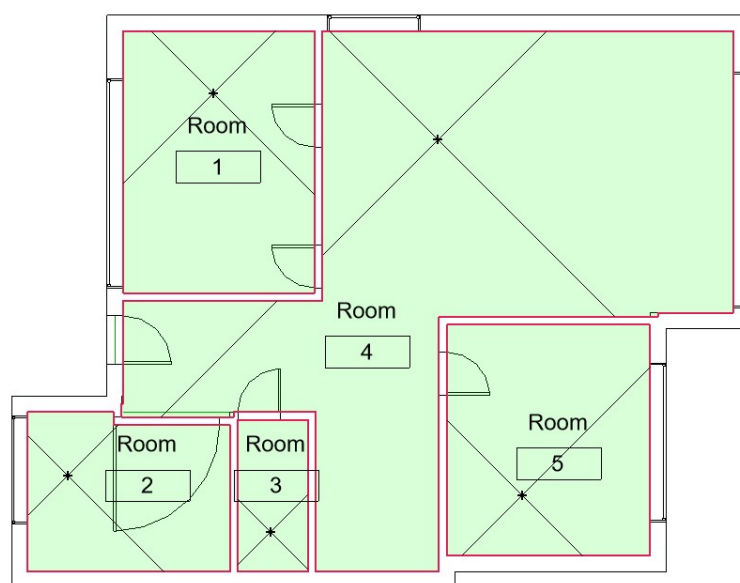


Figura Anexo C 6-Definição dos “Spaces” para definição dos volumes a calcular para as divisões interiores. Capturado do programa Autodesk Revit.

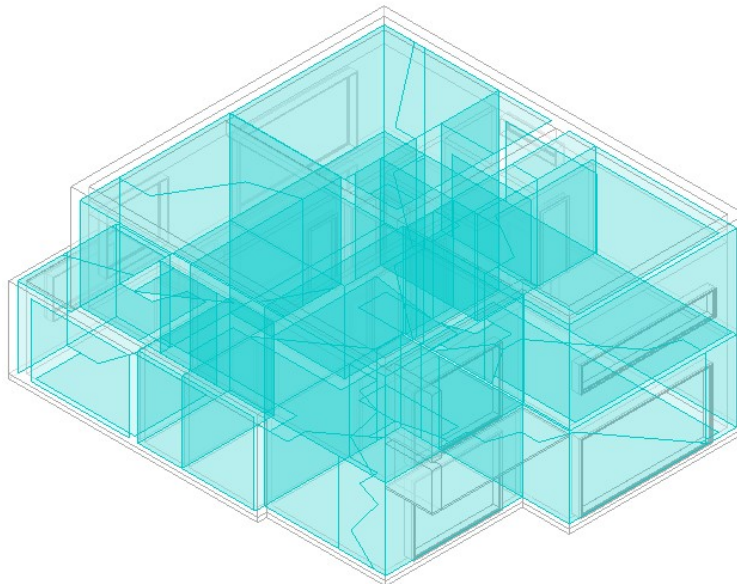


Figura Anexo C 7 - Modelo energético 3D. Capturado do programa Autodesk Revit

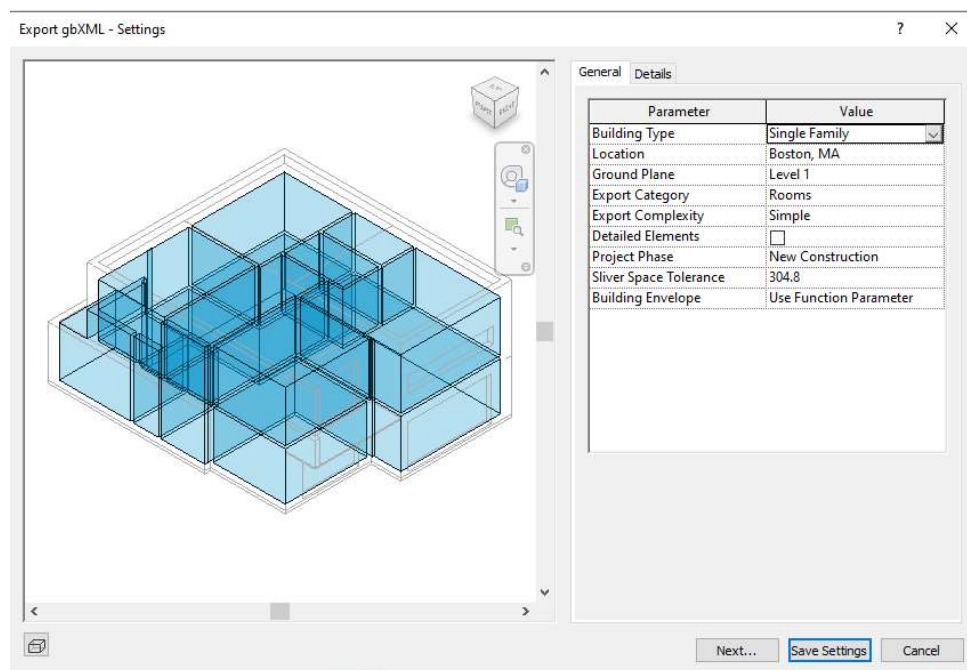


Figura Anexo C 8-Demonstração da fase final de exportação do modelo 3D num ficheiro de formato gbXML. Capturado do programa Autodesk Revit.

D. Análise higrotérmica sem sistemas de ventilação e AVAC

Parede simples de um pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado

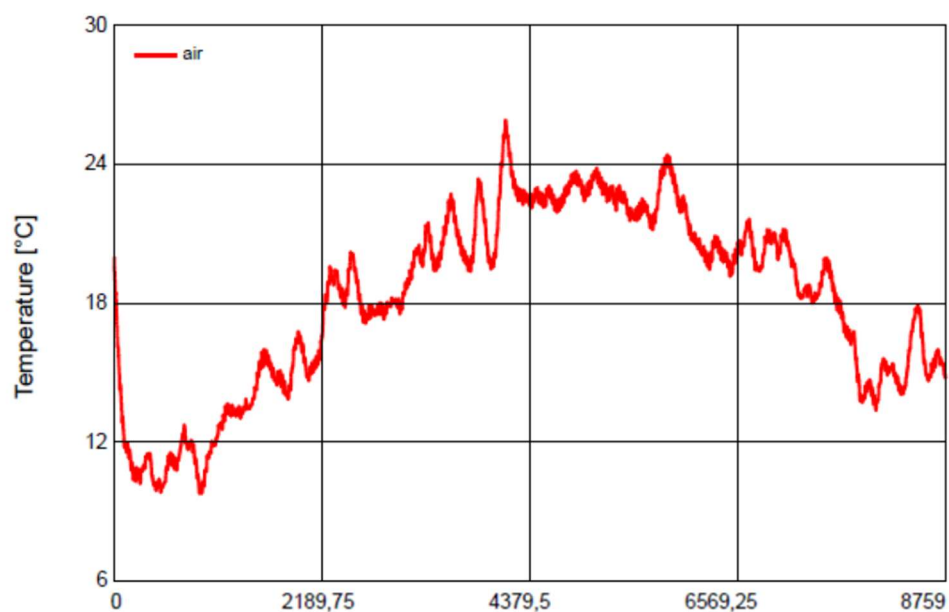


Figura Anexo D 1 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Aveiro. Solução construtiva de parede simples de um pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado.

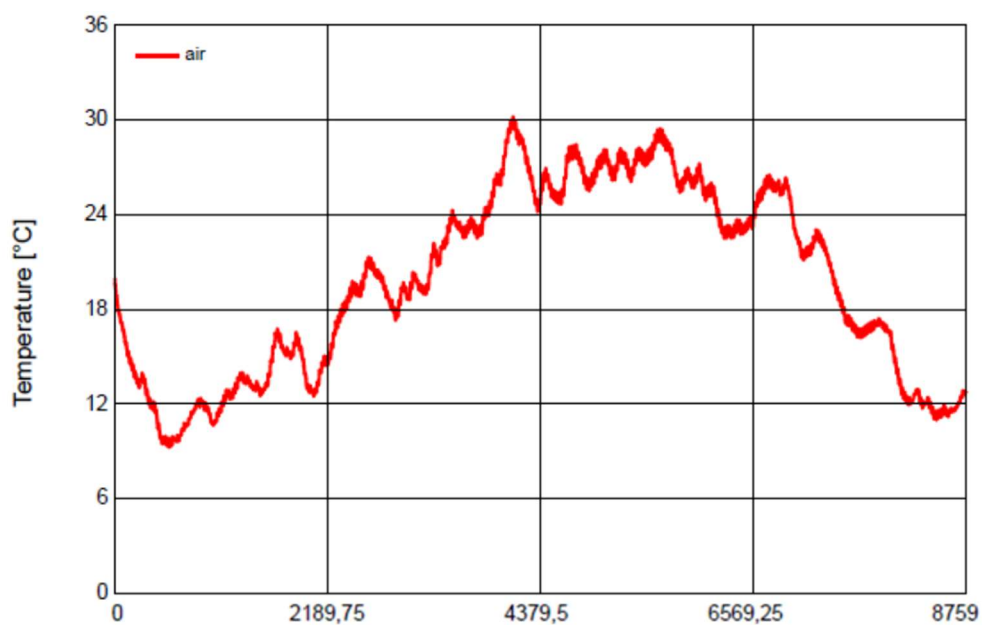


Figura Anexo D 2 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Beja. Solução construtiva de parede simples de um pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado.

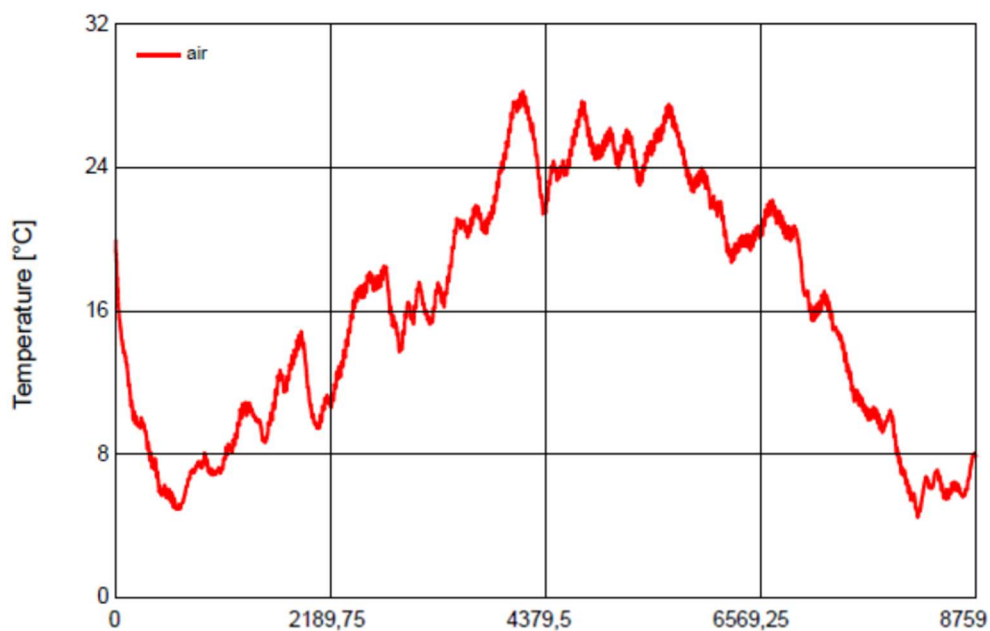


Figura Anexo D 3 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Bragança. Solução construtiva de parede simples de um pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado.

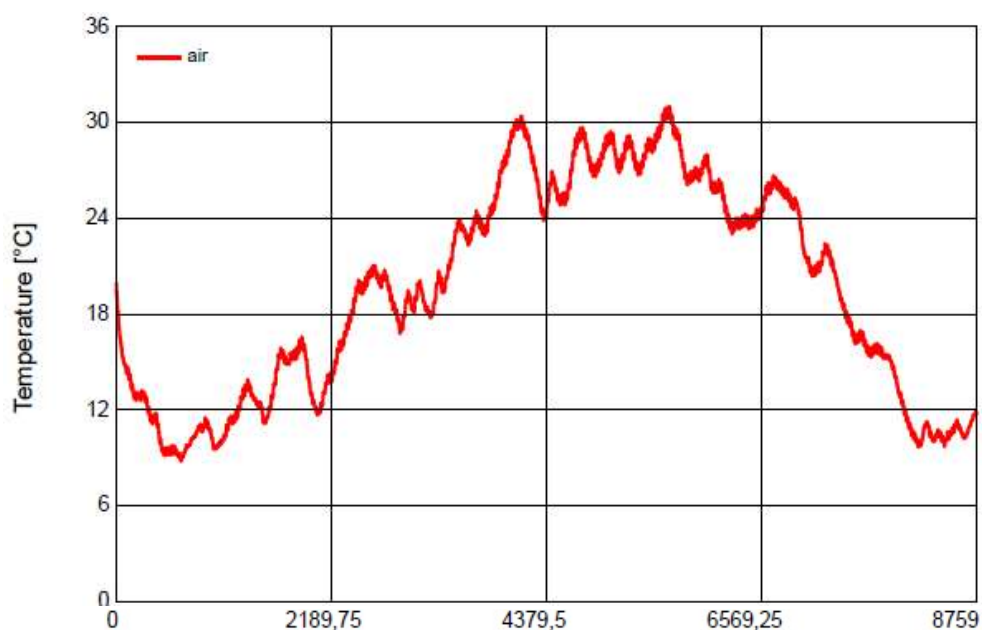


Figura Anexo D 4 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Castelo Branco. Solução construtiva de parede simples de um pano de alvenaria tijolo cerâmico furado.

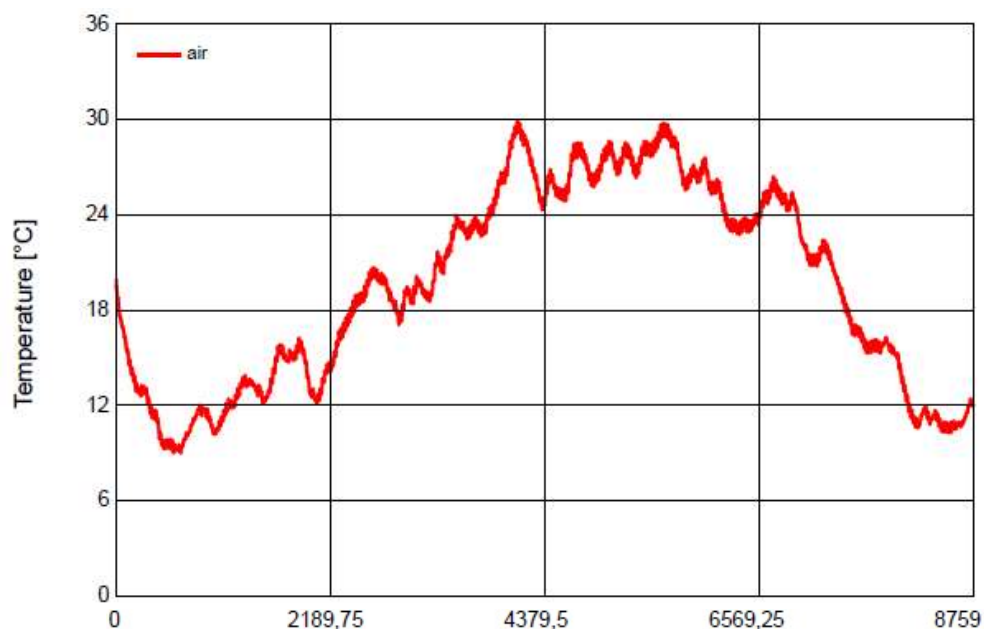


Figura Anexo D 5 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Évora. Solução construtiva de parede simples de um pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado.

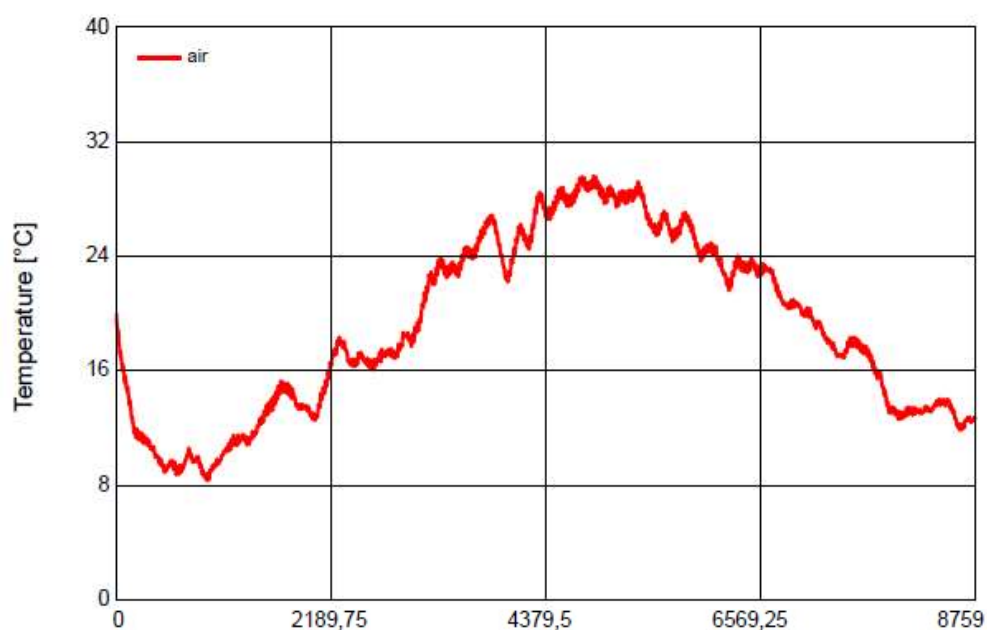


Figura Anexo D 6 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Guarda. Solução construtiva de parede simples de um pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado.

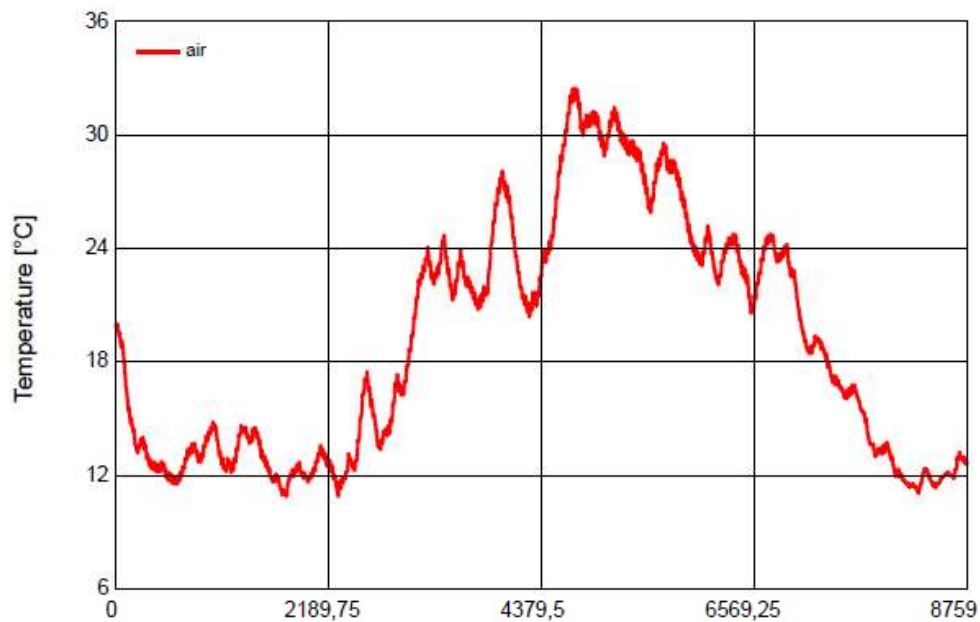


Figura Anexo D 7 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Portalegre. Solução construtiva de parede simples de um pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado.

Parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico furado

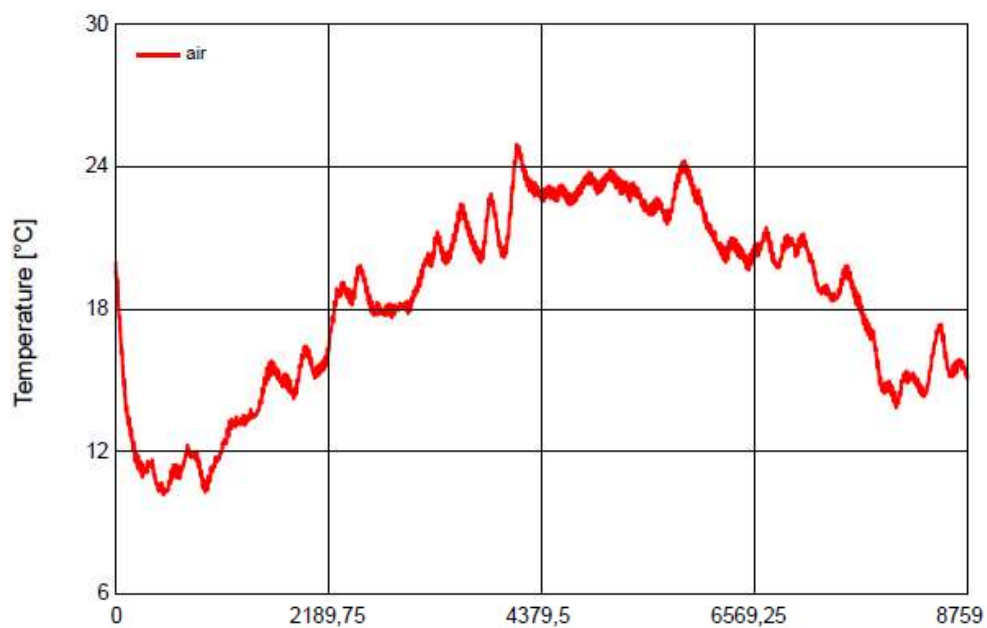


Figura Anexo D 8 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Aveiro. Solução construtiva de parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico furado.

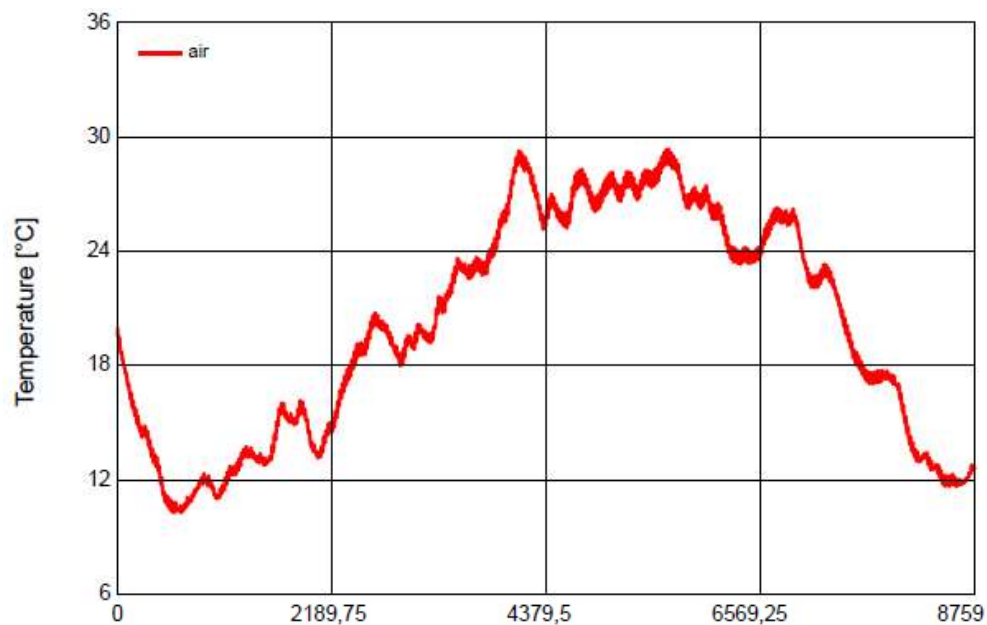


Figura Anexo D 9 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Beja. Solução construtiva de parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico furado.

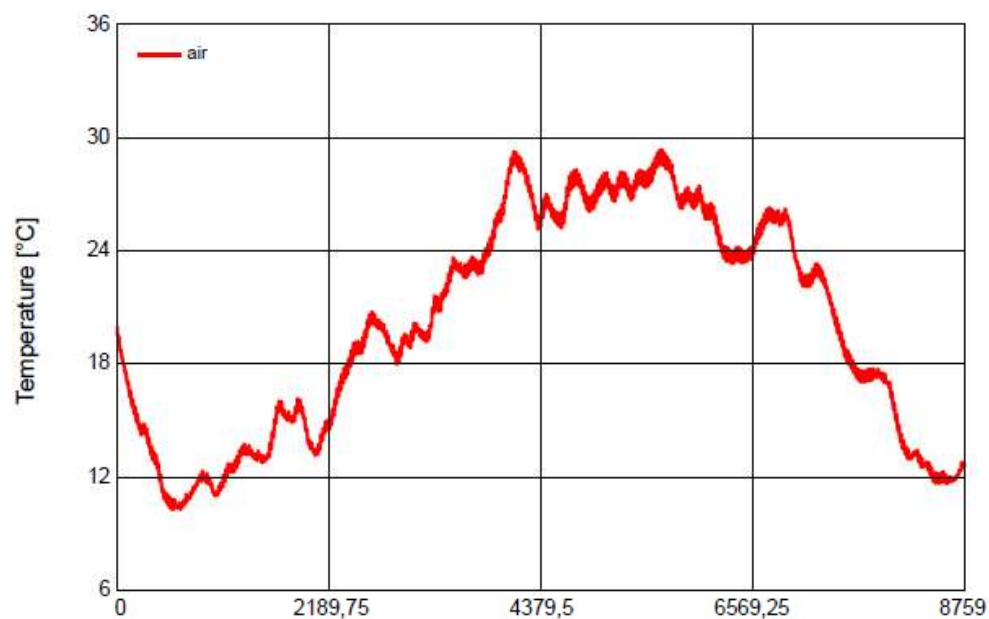


Figura Anexo D 10 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Bragança. Solução construtiva de parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico furado.

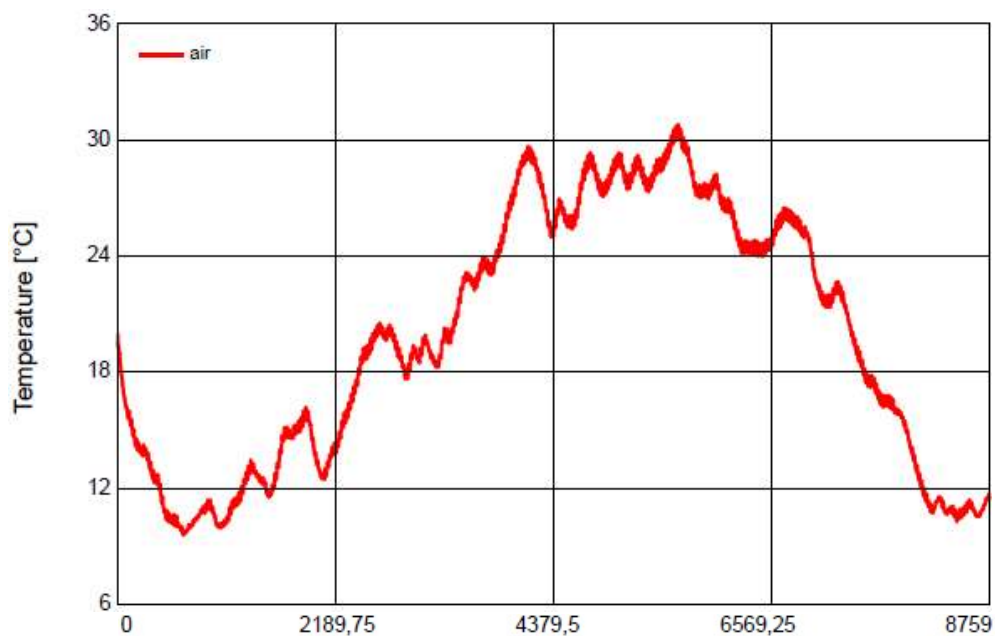


Figura Anexo D 11- Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Castelo Branco. Solução construtiva de parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico furado.

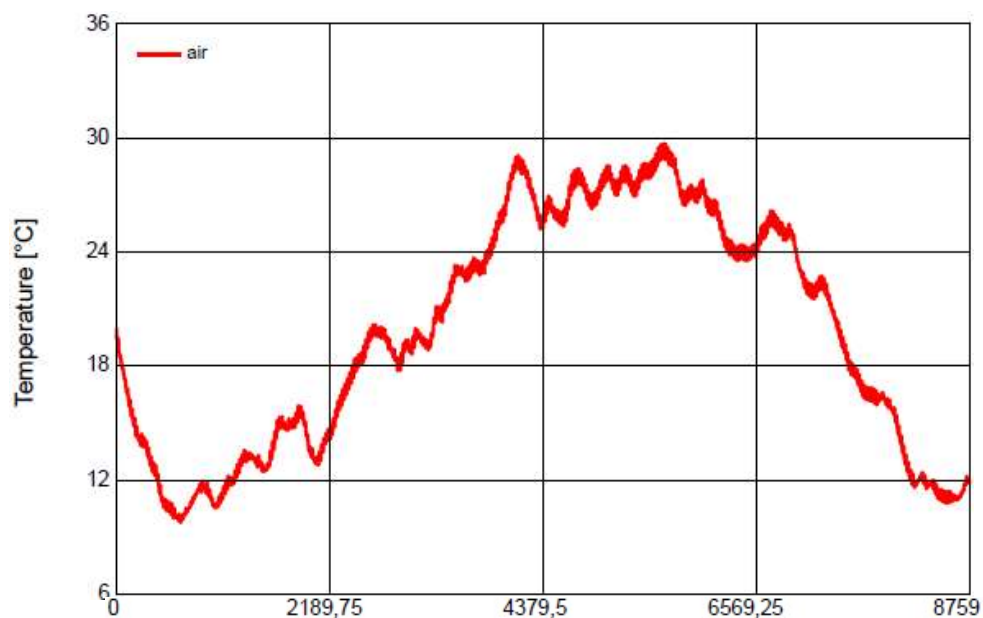


Figura Anexo D 12 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Évora. Solução construtiva de parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico furado.

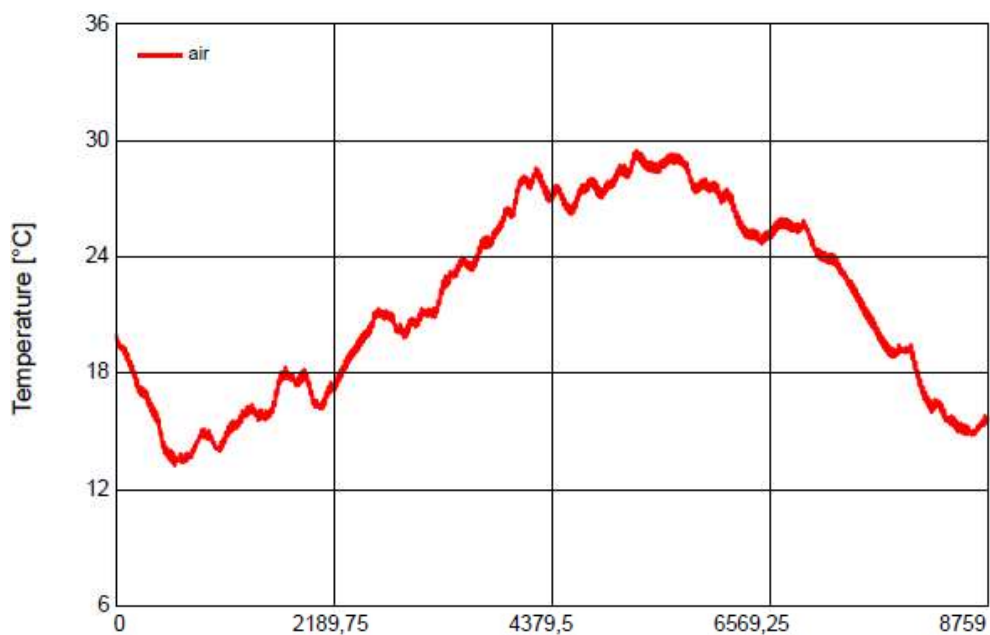


Figura Anexo D 13 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Faro. Solução construtiva de parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico furado.

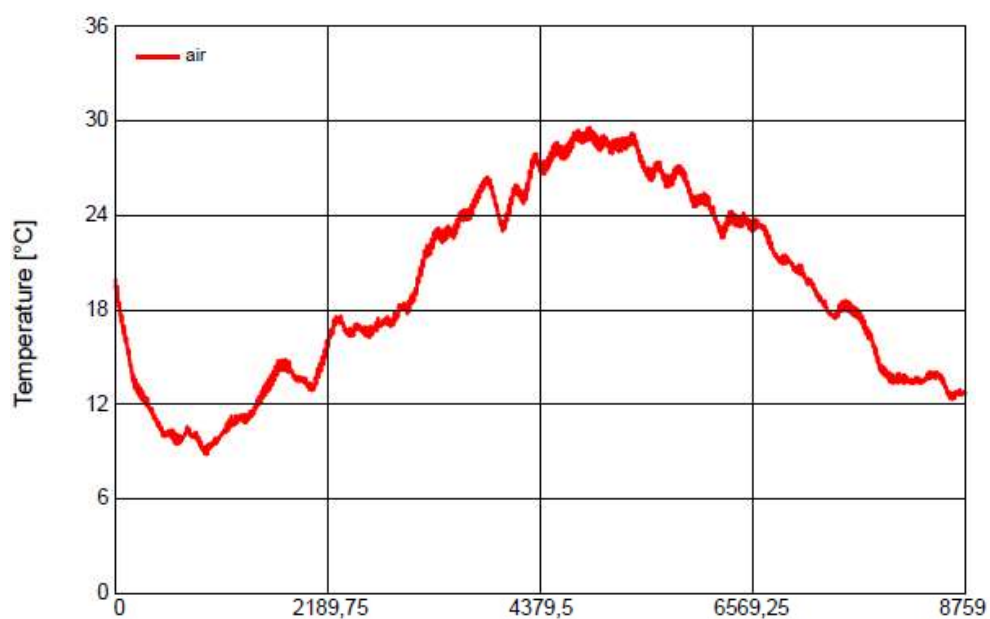


Figura Anexo D 14 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Guarda. Solução construtiva de parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico furado.

Parede resistente de alvenaria de pedra

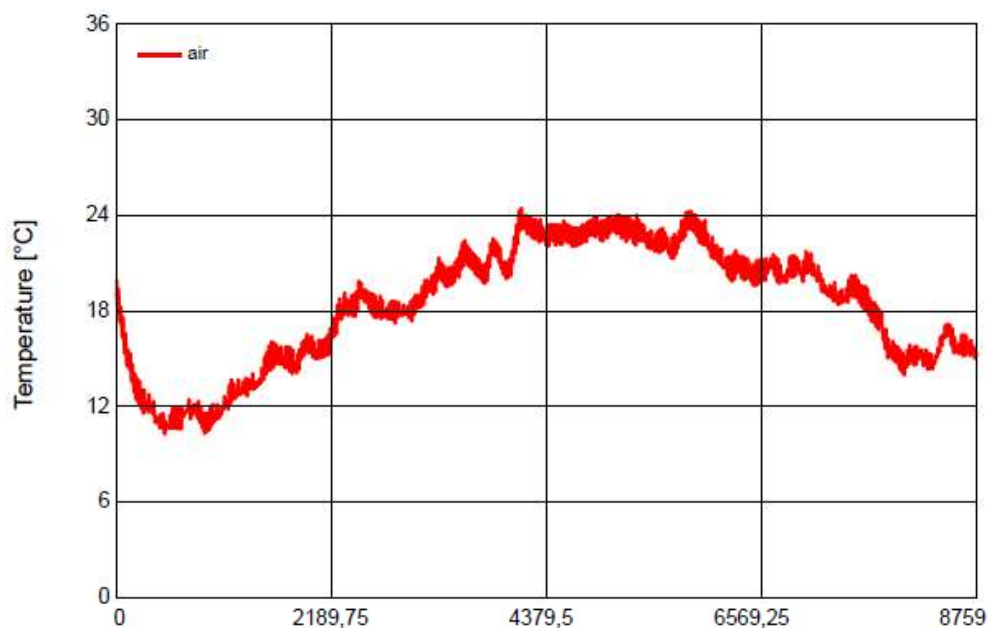


Figura Anexo D 15 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Aveiro. Solução construtiva de parede resistente de alvenaria de pedra.

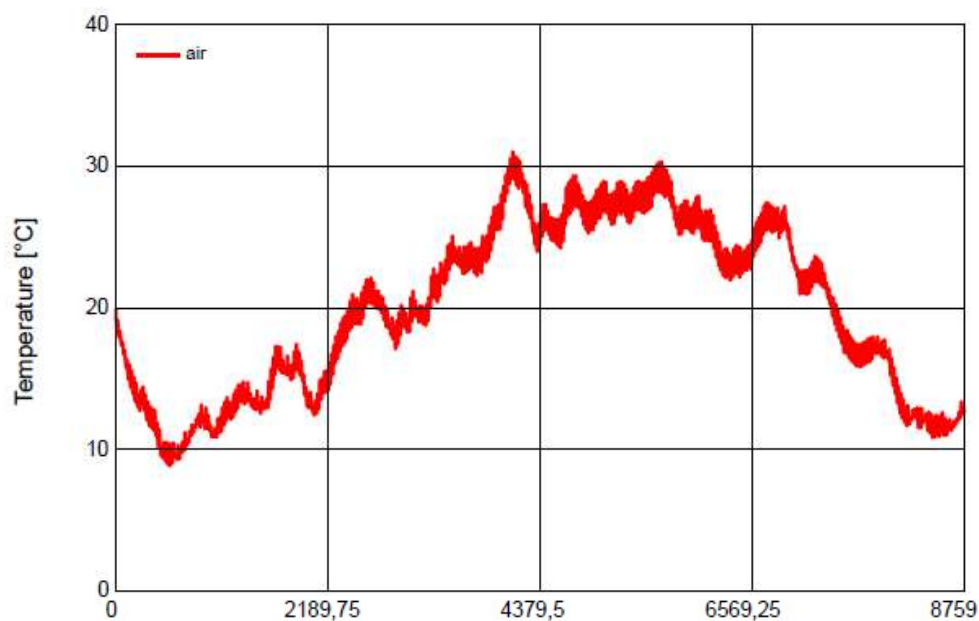


Figura Anexo D 16 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Beja. Solução construtiva de parede resistente de alvenaria de pedra.

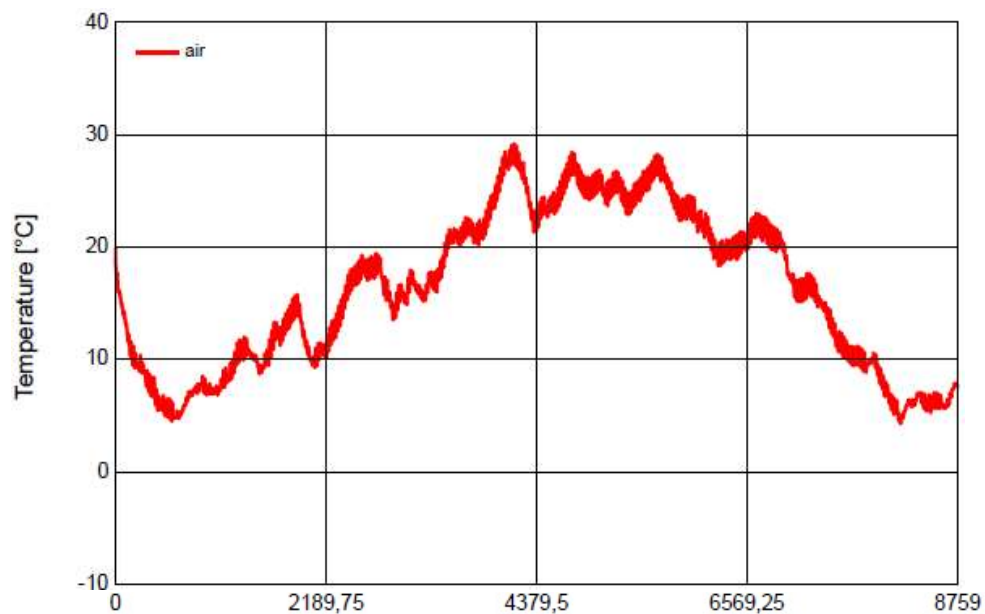


Figura Anexo D 17 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Bragança. Solução construtiva de parede resistente de alvenaria de pedra.

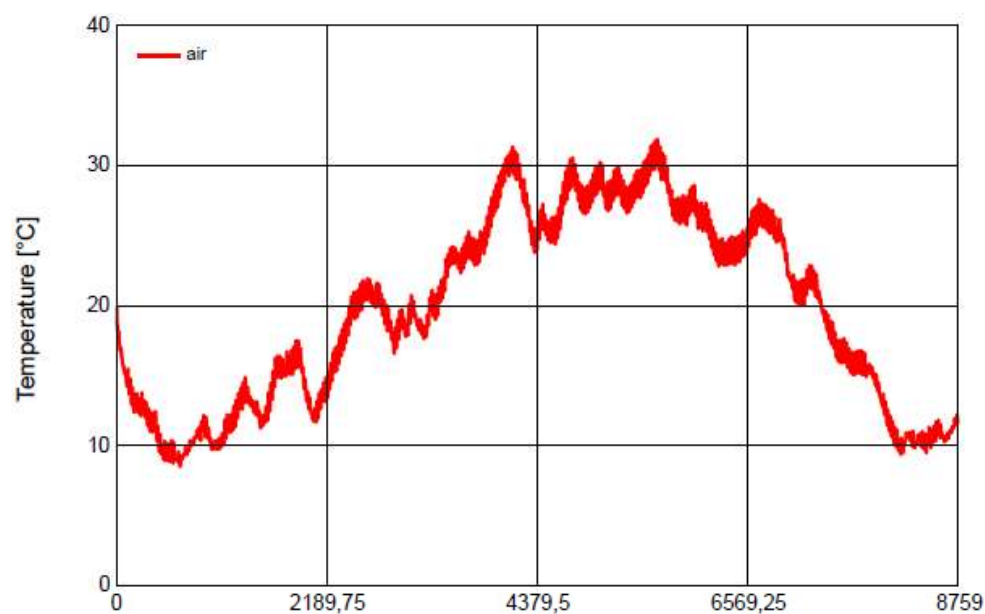


Figura Anexo D 18 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Castelo Branco. Solução construtiva de parede resistente de alvenaria de pedra.

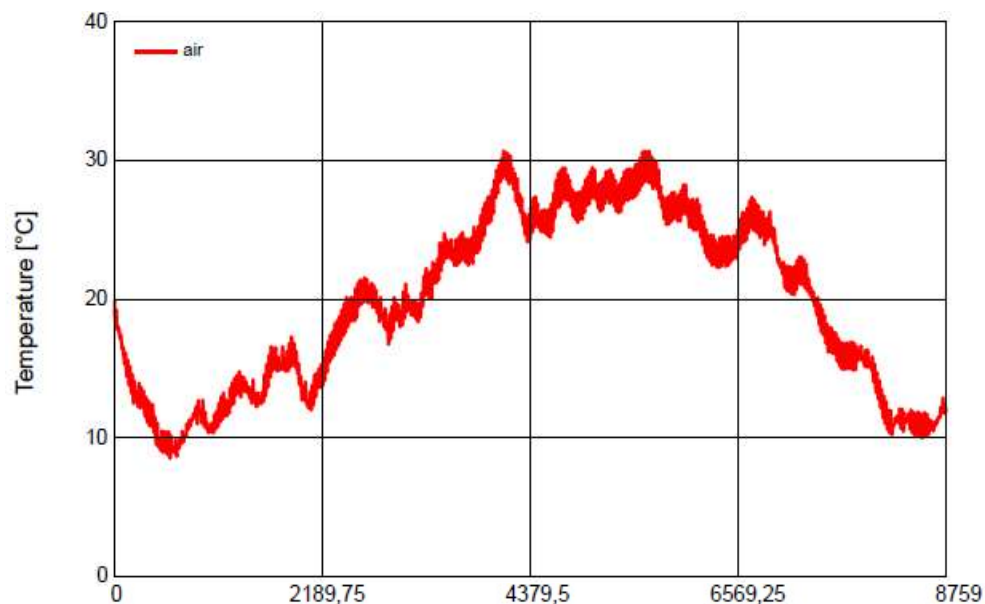


Figura Anexo D 19 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Évora. Solução construtiva de parede resistente de alvenaria de pedra.

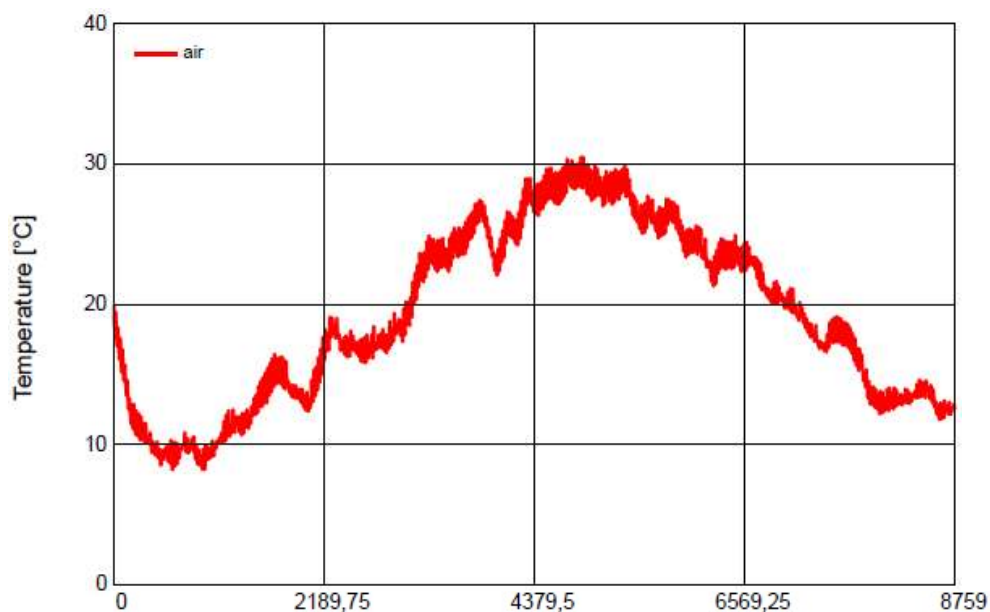


Figura Anexo D 20 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Guarda. Solução construtiva de parede resistente de alvenaria de pedra.

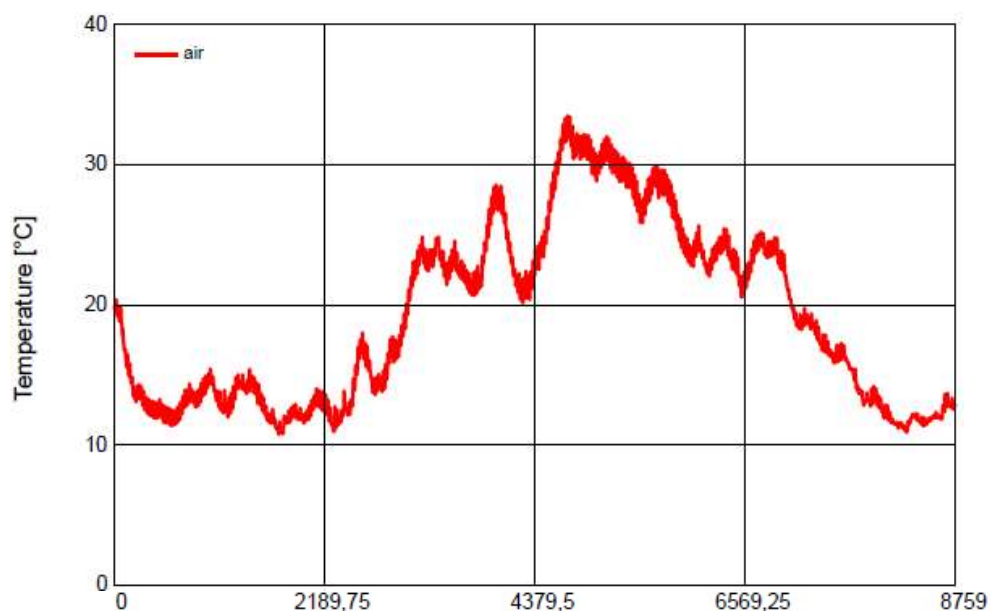


Figura Anexo D 21 - Variação da temperatura do clima interior, por horas, ao longo do ano de referência. Captado através do programa WUFI Plus. “air” – temperatura do ar interior. Localização de Portalegre. Solução construtiva de parede resistente de alvenaria de pedra.

Nota do autor: As restantes localizações apresentam gráficos de linhas semelhantes aos já apresentados em anexo e no corpo de texto do trabalho da dissertação. Posto isto, para não densificar em demasia a apresentação, o autor do presente trabalho optou por prescindir de demonstrar os restantes gráficos de linhas.

E. Índices estatísticos

A nomenclatura e formulas utilizadas para o cálculo dos índices foram as indicadas pelo *ASHRAE Guideline 14-2014* utilizadas e recomendadas por Huerto-Cardenas et.al [54] tendo sido escolhido para a presente dissertação o índice *Mean Bias Error* (MBE), *Coefficient of determination* (R^2) e *Range Normalized Root Mean Square Error* (RMSE). Utilizaram-se três índices para mitigar possíveis erros de cálculo e para tornar mais coerente a conclusão acerca dos resultados obtidos relativamente aos dados simulados.

Os cálculos foram efetuados recorrendo ao *software* de programação Python, utilizando um *environment* criado com o *software* Anaconda com a extensão *pandas*, recorrendo a um computador com as seguintes propriedades: Processador Intel® Core™ i5 – 5200 CPU @ 2.2GHz; 8,00 GB memória RAM; Sistema Operativo Windows 10 de 64 bits.

Coefficient of determination (R^2)

Este índice traduz a proximidade a que os valores simulados se encontram da linha de regressão dos valores medidos. A fronteira dos resultados do índice define-se entre 0 e 1.00, quanto mais próximo o resultado estiver de 1.00 mais aproximados são os valores simulados dos medidos.

A *ASHRAE Guideline 14-2014* define como aceitáveis, resultados maiores ou iguais a 0.75, Coelho et.al [29] assumiu a mesma recomendação para R^2 .

$$R^2 = \left(\frac{n \cdot \sum_{i=1}^n m_i \cdot s_i - \sum_{i=1}^n m_i \cdot \sum_{i=1}^n s_i}{\sqrt{(n \cdot \sum_{i=1}^n m_i^2 - (\sum_{i=1}^n m_i)^2) \cdot (n \cdot \sum_{i=1}^n s_i^2 - (\sum_{i=1}^n s_i)^2)}} \right)^2 \quad 6.1$$

Onde m_i significa os valores medidos, s_i significa os valores simulados e n , o total de valores na amostra.

Mean Bias Error (MBE)

Este índice reproduz a média de erros de uma dada amostra, somando as diferenças entre os valores simulados e medidos dividindo-os pelo total dos dados existentes na amostra sendo um indicador apropriado para uma avaliação sobre a generalidade dos valores simulados em relação à linha de regressão dos valores medidos, tal como mencionado por Ruiz et.al [55]. É assim, um bom indicador para se poder interpretar a variação dos valores simulados em relação aos medidos sabendo se os valores simulados sobrestimam ou subestimam os valores medidos *in situ*, significando o seguinte que, resultados positivos significam que os valores simulados subestimam os medidos e valores negativos significam que existe uma sobrestimação sobre os valores medidos [54], quanto mais perto do zero estiverem os resultados de MBE, mais perto estão os valores simulados dos medidos. Chakraborty et.al assumiu como aceitáveis resultados com cerca de 0,1 negativo ou positivo, baseando-se na norma *ASHRAE Guideline 14-2014*, sendo esta fronteira assumida na presente dissertação.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{n} \quad 6.2$$

Onde m_i significa os valores medidos, s_i significa os valores simulados e n , o total de valores na amostra.

Range Normalized Root Mean Square Error (RNRMSE)

Como mencionado por Huerto-Cardenas et.al, este índice é uma normalização do índice *Root Mean Square Error* (RMSE), usando a totalidade dos valores medidos no processo de normalização em vez da média de valores. Optou-se por executar este índice em alternativa ao índice mais usado na bibliografia, o *Coefficient of Variation Root Mean Square Error* (CVRMSE) pois, Huerto-Cardenas et.al e Chakraborty et.al [56] mencionam e demonstraram que o RNRMSE retorna resultados mais exatos relativamente à comparação de valores medidos e simulados, pois como o índice CVRMSE utiliza a média dos valores os resultados podem variar consideravelmente.

Os resultados considerados aceitáveis para o índice foram assumidos como menores ou iguais a 20% tal como Coelho et.al [29].

$$RN_{RMSE(\%)} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}}}{\text{maximum}(Y) - \text{minimum}(Y)} \times 100 \quad 6.3$$

2024

BRUNO MANUEL REAL DE SOUSA
MELRO

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES TIPOLOGIAS DE FICHEIROS CLIMÁTICOS
PARA ANÁLISE HIGROTÉRMICA DE EDIFÍCIOS