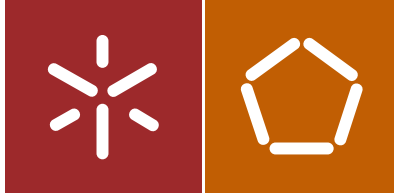


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Marta Isabela Fernandes Oliveira
Compatibilização entre sombreamento acústico e sombreamento solar para uma forma urbana mais sustentável

Marta Isabela Fernandes Oliveira

Compatibilização entre sombreamento acústico e sombreamento solar para uma forma urbana mais sustentável



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Marta Isabela Fernandes Oliveira

Compatibilização entre sombreamento
acústico e sombreamento solar para uma
forma urbana mais sustentável

Tese de Doutoramento
Programa Doutoral em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Lúgia Torres Silva
Professor Doutor Paulo Mendonça
Professor Doutor Martin Tenpierik

DIREITOS DE AUTORE CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição

CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

À Professora Lígia Torres Silva, supervisor científico desta tese, pelos importantes conhecimentos transmitidos, pela orientação, sugestões e críticas e muito especialmente pelo excecional empenho com que sempre me acompanhou ao longo deste trabalho.

Ao Professor Paulo Mendonça, pela supervisão, pelo seu contributo científico, pelas sugestões e pela disponibilidade e apoio.

Ao Professor Martin Tenpierik, supervisor científico desta tese, pelas sugestões e pela disponibilidade,

Um agradecimento à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento através da bolsa SFRH/BD/136558/2018, sem o qual não teria sido possível a realização desta tese.

Gostaria ainda de expressar a minha gratidão ao Arquiteto Pedro Santiago, pelo precioso auxílio prestado durante a fase da programação do modelo. Obrigada pela consideração.

Gostaria de expressar o meu profundo agradecimento às pessoas (um especial ao professor Rui Ramos e ao professor Paulo Ribeiro) e instituições que de alguma forma contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Um especial agradecimento aos meus amigos (Sandra Bourbon, Joana Caldas, Ana Couto, Melanie Casto, Rui Santos e Mário Franco) por tudo. A minha gratidão pelo precioso auxílio prestado durante todo o processo, e, em particular, à Sandra Cunha, à Carla Oliveira e aos meus colegas de Doutoramento (em especial à Cláudia e à Nadhima, ao Júlio e ao Gabriel).

Aos meus pais e aos meus familiares mais próximos (em especial à prima Isabel)

À Dra. Fátima por tudo e mais alguma coisa.

O maior agradecimento é ao meu filho Afonso, que me faz continuar.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

O estudo aborda a relação entre a exposição solar e o sombreamento acústico nas formas urbanas em Portugal, analisando as implicações das regulamentações existentes e propondo soluções para otimizar ambas as variáveis. A legislação portuguesa estabelece um afastamento de 45° entre edifícios, o que pode comprometer a exposição solar direta dos pisos inferiores durante o inverno, dada a altura solar.

No estudo preliminar, foram analisadas diferentes tipologias urbanas, verificando-se que formatos com "reentrâncias" (U, L ou O) proporcionam melhor proteção acústica, enquanto formas lineares e compactas maximizam a exposição solar. No entanto, essas tipologias com reentrâncias podem obstruir a radiação solar, criando um conflito entre a otimização térmica e acústica.

O estudo de caso realizado em Viana do Castelo validou essa relação através de medições *in situ* e simulações. Foram identificadas fachadas com menor exposição ao ruído (como nos pátios) e com maior exposição solar (fachadas orientadas a sul sem obstrução). A análise de sensibilidade (com variações de forma) demonstrou que soluções com pátios fechados reduzem o ruído, mas também comprometem a exposição solar, já nas fachadas lineares a exposição solar aumenta, mas também a exposição ao ruído.

O estudo comprovou que a altura dos edifícios influencia as duas variáveis, isto é, a exposição solar e a redução do ruído aumentam nos pisos superiores. A experiência francesa foi analisada como referência por integrar requisitos acústicos na regulamentação térmica, demonstrando que é possível alcançar um compromisso entre proteção acústica e exposição solar.

O estudo conclui que não existem soluções perfeitas, mas incentiva a consideração da compatibilização térmico-acústica desde a fase de projeto, com o objetivo de reduzir o consumo energético recomenda o uso de soluções passivas, como fachadas livres de obstáculos a sul e elementos redutores de ruído (como os pátios). Para edificações existentes, promover o equilíbrio entre proteção (isolamento) e permeabilidade (distribuição por áreas sensíveis) de forma a mitigar o impacto da exposição ao ruído e simultaneamente não condicionar a exposição solar.

Palavras-chave: Forma Urbana, Radiação Solar, Ruído urbano, Sombreamento acústico, Sombreamento solar

Abstract

The study addresses the relationship between solar exposure and acoustic shading in urban forms in Portugal, analysing the implications of existing regulations and proposing solutions to optimise both variables. Portuguese legislation establishes a distance of 45° between buildings, which can compromise the direct solar exposure of the lower floors during the winter, given the solar height.

In the preliminary study, different urban typologies were analysed and it was found that shapes with 'recesses' (U, L or O) provide better acoustic protection, while linear and compact shapes maximise solar exposure. However, these typologies with recesses can obstruct solar radiation, creating a conflict between thermal and acoustic optimisation.

The case study carried out in Viana do Castelo validated this relationship through in situ measurements and simulations. Facades with lower noise exposure (such as patios) and higher solar exposure (south-facing facades without obstruction) were identified. Sensitivity analysis (with shape variations) showed that solutions with closed courtyards reduce noise but also compromise solar exposure, while linear façades increase solar exposure but also noise exposure.

The study showed that the height of the buildings influences both variables, that is, sun exposure and noise reduction increase on the upper floors. The French experience was analysed as a benchmark for integrating acoustic requirements into thermal regulations, demonstrating that it is possible to achieve a compromise between acoustic protection and solar exposure.

The study concludes that there are no perfect solutions but encourages the consideration of thermal-acoustic compatibility from the design phase, with the aim of reducing energy consumption, and recommends the use of passive solutions, such as facades free of obstacles to the south and noise-reducing elements (such as patios). For existing buildings, promote a balance between protection (insulation) and permeability (distribution to sensitive areas) in order to mitigate the impact of noise exposure while at the same time not conditioning solar exposure.

Keywords: Urban form, Solar radiation, Urban noise, Acoustic shading, Solar shading

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Enquadramento	1
1.2.	Motivação	2
1.3.	Oportunidade de estudo	3
1.4.	Questões de investigação	4
1.5.	Objetivos.....	4
1.6.	Estrutura da tese	6
2.	ESTADO DA ARTE	7
2.1.	Forma Urbana	7
2.1.1.	Importância da forma urbana na sustentabilidade de uma cidade (smart city).....	7
2.1.2.	Políticas urbanas de sustentabilidade e de energia na União Europeia	9
2.1.3.	Políticas urbanas de sustentabilidade e energia em Portugal.....	12
2.1.4.	Relação da forma urbana com a exposição ao ruído urbano	13
2.1.5.	Relação da forma urbana e a exposição à radiação solar	14
2.2.	Ruído urbano	16
2.2.1.	Sombreamento acústico	19
2.2.1.1.	Casos de Estudo de Sombreamento Acústico	25
2.2.1.2.	Software de Cálculo de Sombreamento Acústico	27
2.2.1.2.1.	CNOSSOS e as respetivas equações fundamentais.....	31
2.2.1.3.	Equipamentos de medição de ruído	32
2.3.	Radiação solar	33
2.3.1.	Sombreamento solar.....	36
2.3.2.1	Casos de estudo de sombreamento solar	36
2.3.2.2.	Métodos de cálculo do sombreamento solar	41
2.3.1.1.1.	As equações de cálculo do sombreamento solar	44
2.3.2.3.	Equipamentos de medição de radiação solar	47
2.4.	Enquadramento regulamentar	52
2.4.1.	Enquadramento legal do ruído ambiental em Portugal e na União Europeia	52
2.4.1.1.	Evolução legislativa acústica em Portugal	53
2.4.2.	Enquadramento legal do comportamento térmico dos edifícios em Portugal e na União Europeia	55
2.4.2.1.	Evolução legislativa térmica em Portugal	56
2.5.	Correlação entre forma urbana, ruído urbano e radiação solar	59
2.5.1.	O caso francês.....	59
2.5.2	Evolução legislativa térmica em França.....	62
2.5.2.1	Caracterização da regulamentação térmica francesa.....	63
2.5.2.2	Consequências da implementação da regulamentação europeia.....	66
3.	METODOLOGIA	67
3.1.	Fundamentação epistemológica da metodologia	67
3.2.	Processo metodológico	68
4.	ESTUDO PRELIMINAR	71
4.1.	Modelo teórico: modelo de vizinhança próxima	71
4.1.1	Classificação programática	71

4.1.2 Classificação morfológica	72
4.1.3 Exigências de projeto aplicáveis aos espaços da vizinhança próxima	74
4.2 Cálculo dos indicadores de forma	78
4.2.1 1º Estudo: o cálculo da propagação do ruído urbano das 10 formas urbanas	82
4.2.2 2º Estudo: o cálculo da radiação solar incidente nas 10 formas urbanas	84
4.2.2.1 Processo de Clustering	86
Seleção do período temporal	88
4.2.3 Análise da Relação entre Forma Urbana, Radiação Solar e Ruído urbano.....	88
4.2.3.1 Índice de Compacidade, radiação solar e níveis de ruído.....	89
4.2.3.2 Índice de Porosidade, radiação solar e níveis de ruído.....	90
4.2.3.3 Índice de Complexidade de Perímetro, radiação solar e níveis de ruído.....	91
4.2.4 Análise da correlação dos 3 indicadores de forma com a exposição ao ruído e à radiação solar	93
4.3 Conclusões a partir da análise preliminar.....	95
4.3.1 Os pressupostos e condicionantes do estudo preliminar.....	95
4.3.2 Algumas conclusões do estudo preliminar e premissas para o estudo de caso	96
4.3.3 Limitações	97
5. ESTUDO DE CASO.....	99
5.1 Enquadramento do caso de estudo	99
5.1.1 Enquadramento geográfico.....	99
5.1.2 Enquadramento climático.....	102
5.2 Ferramentas de Estudo	105
5.2.1 Equipamentos utilizados na medição de ruído	105
5.2.2 Ferramentas de simulação do ruído.....	106
5.2.3 Equipamentos utilizados na medição da radiação solar.....	107
5.2.4 Ferramentas de simulação da radiação solar.....	108
5.3 Validação dos modelos.....	113
5.3.1 Ruído (Validação)	114
5.3.1.1 Seleção de Pontos de Medição “in situ” (pontos de validação)	114
5.3.1.2 Contagem de Tráfego.....	114
5.3.1.3 Ruído medido nos pontos de validação.....	115
5.3.1.4 Resultados comparativos entre pontos medidos e pontos modelados	118
5.3.2 Radiação solar (Validação).....	121
5.3.2.1 Radiação solar medida nos pontos de validação	121
5.3.2.2 Resultados Comparativos de radiação solar (Pontos Medidos vs Pontos Modelados)	129
5.4 Análise de sensibilidade	138
5.4.1 Análise de Variações de Forma.....	140
5.4.1.1 Análise de Variação A.....	140
5.4.1.2 Análise de Variação B	145
5.4.1.3 Análise de Variação C	149
5.4.1.4 Análise de Variação D	153
5.4.1.5 Análise de Variação E.....	157
5.4.1.6 Análise comparativa	161
5.4.2 Análise de Variações de Forma por fachada e piso	165
5.4.2.1 Resultados da análise	168
6. ANÁLISE E PROPOSTAS	171
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	181

8. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	190
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	192
ANEXO I	206
ANEXO II	208
ANEXO III	211
ANEXO IV	214
Variação A	215
Variação B	223
Variação C	228
Variação D	233
Variação E	241

Lista de Abreviaturas

2D – Desenho duas dimensões

3D – Desenho três dimensões

ADENE - Agência para a Energia

ANSI- American National Standards Institute (Instituto Nacional Americano de Normas)

APA- Agência Portuguesa do Ambiente

ASHRAE- American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado)

ASTM- American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana de Ensaios e Materiais)

BIM- Building Information Modelling (Modelação da informação da construção)

CAD- Computer Aided Design (Desenho assistido por computador)

CadnaA – Computer Aided Noise Abatement (Abatimento de ruído auxiliado por computador)

CE- Comissão Europeia

CEN - Comité Europeu de Normalização

CEN EPBD - Diretivas de Desempenho Energético dos Edifícios do Comité Europeu de Normalização

CNOSSOS-EU - Métodos Comuns de Avaliação do Ruído na Europa

CI - Índice de Compacidade

CLIMAS-SCE - Software para o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios.

DB HE – Economia de Energia

EN- Norma Europeia

EU – União Europeia

EPBD – Energy Performance of Buildings Directive (Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios)

Fractal- Índice de Complexidade de Perímetro

GEE – Gases com Efeito de Estufa

GIS- Sistema de Informação Geográfica

IEC- International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)

ISO - Organização Internacional de Normalização

LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia

MAE - Mean Absolute Error (Erro Absoluto Médio)

MDE- Modelo Digital de Elevação

(NMPB 96) -Novo Método de Previsão do Ruído do Tráfego

NUTS- Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos

NzEB - Near Zero Energy Building (Edifício com energia quase zero)

NZEB - Net Zero Energy Building (Edifício Energia Zero)

OMM- Organização Meteorológica Mundial

PNAEE - Plano Nacional e Ação para a Eficiência Energética

PNAER - Plano Nacional e Ação para as Energias Renováveis

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização

RECS - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

REH - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

RGEU- Regulamento Geral das Edificações Urbanas

RMSE- Root-Mean-Squared Error (Erro Quadrático Médio)

Revit Solar Analysis - Software de modelação de análise solar

ROS - Índice de Porosidade

RT (Ano) - Regulamentação Térmica Francesa criada no ano referente

SCE - Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

UC PDEC - Programa Doutoral em Engenharia Civil da Universidade do Minho

UEEG – Urban Environmental Expert Group (Grupo de especialistas em ambientes urbanos)

Lista de Figuras

Figura 1: Ilustração do afastamento entre fachadas previsto nos artigos 59.º a 62.º do RGEU	2
Figura 2: Esquema representativo das correlações do estudo pretendido.....	3
Figura 3: Evolução dos planos de desenvolvimento sustentável mundial (Adaptado de: (UN, 2017)....	11
Figura 4: Ilustração dos níveis de pressão sonora (Fonte: (Ministère de Territoire, 1978))	17
Figura 5: Ilustração da gama de frequências (Fonte: (Ministère de Territoire, 1978)).....	18
Figura 6: Ilustração das curvas de ponderação de frequência (Fonte: (Gerges, 1992))	18
Figura 7: Ilustração do efeito sonoro e a criação da área sombra (Fonte: (Hannah, 2006))	19
Figura 8: Ilustração tipo de barreiras acústicas (Fonte: (Hannah, 2006))	20
Figura 9: Ilustração de uma zona “buffer” (Fonte: (Ministère de Territoire, 1978))	21
Figura 10: Localização do edifício privilegiando a criação de zonas sombra (Fonte: (L. T. Silva, 2007))	22
Figura 11: Correção de barreira em função da distância (Fonte: (Department of Transport and Welsh Office, 1988))	23
Figura 12: Ilustração da atenuação da barreira acústica para a zona iluminada e para zona de sombra (Fonte: (Department of Transport and Welsh Office, 1988))	23
Figura 13: Ilustração do efeito da difração dependendo da frequência (Fonte: (Metropolitan Acoustics, 2017))	24
Figura 14: Efeito da radiação solar numa parede opaca exterior e num pano transparente exterior (Fonte: (Frota & Schiffer, 2001))	34
Figura 15: Trocas térmicas secas em edifícios (convecção, condução e radiação) e o efeito da radiação incidente (Adaptado de: (Coutinho, 2018))	34
Figura 16: Plano de análise do ângulo de horizonte e sua representação (Adaptado de: (Ministério da Economia e do Emprego, 2013))	46
Figura 17: Comparação do espectro da radiação solar com as respostas espectrais do piranómetro de termopilha e do piranómetro de silício. Fonte: Instituto Solar dos EUA (2023).....	49
Figura 18: Cronograma da Evolução Regulamentar em Portugal em termos de ruído ambiental e acústica	54
Figura 19: Cronograma da Evolução da Regulamentação térmica em Portugal	58
Figura 20: Evolução regulamentar térmica-acústica em França	62
Figura 21: Os três requisitos gerais da RT 2012 Fonte: (Lopes, 2016) Adaptado de planbatimentdurable.fr@ (2013))	63
Figura 22: Ilustração Tipo de Implantação, fechada (a) linear (b) e pontual (c) (Fonte: (Pedro, 2002)).	75
Figura 23: Ilustração Tipo de Acesso contínuo (a) impasse (b) e anel (c) (Fonte: (Pedro, 2002))	75
Figura 24: Ilustração da Forma 1 e Dimensões da Forma 1	75
Figura 25: Ilustração da Forma 2 e Dimensões da Forma 2	76
Figura 26: Ilustração da Forma 3 e Dimensões da Forma 3	76
Figura 27: Ilustração da Forma 4 e Dimensões da Forma 4	76
Figura 28: Ilustração da Forma 5 e Dimensões da Forma 5	76
Figura 29: Ilustração da Forma 6 e Dimensões da Forma 6	76
Figura 30: Ilustração da Forma 7 e Dimensões da Forma 7	77
Figura 31: Ilustração da Forma 8 e Dimensões da Forma 8	77
Figura 32: Ilustração da Forma 9 e Dimensões da Forma 9	77
Figura 33: Ilustração da Forma 10 e Dimensões da Forma 10	77

Figura 34: Ilustração Índice de “Compacidade”	78
Figura 35: Ilustração do Índice de Porosidade	79
Figura 36: Ilustração do Índice de Complexidade de Perímetro (fractal)	80
Figura 37: Ilustração da grelha quadrangular de cálculo da Forma 1	83
Figura 38: Análise da Forma 3.....	87
Figura 39: Análise da Forma 4.....	87
Figura 40: Análise da Forma 7	87
Figura 41: Análise da Forma 9.....	87
Figura 42: Gráfico Relacional do Índice de Compacidade com os Níveis de Ruído e com a Radiação solar no período de aquecimento para as formas selecionadas.....	89
Figura 43: Gráfico Relacional do Índice de Porosidade com os Níveis de Ruído e com a Radiação solar no período de aquecimento para as formas selecionadas.....	91
Figura 44: Gráfico Relacional do Complexidade de Perímetro com os Níveis de Ruído e com a Radiação solar no período de aquecimento para as formas selecionada	92
Figura 45: Área de estudo de caso na Rua D. Maria II (Viana do Castelo). (A) Contexto europeu; (B) NUTS III Alto Minho e Concelho de Viana do Castelo; e (C) Localização da área de estudo.....	100
Figura 46: Vista da área do quarteirão escolhido como estudo de caso e as respetivas marcações dos pontos de recolha de dados (PC) para a radiação solar 4 (PC) (a) e para o ruído 9 (PC)(b)	101
Figura 47: Representação das zonas climáticas de inverno (a) e de verão (b) em Portugal continental (Fonte: (Diário da República, 2.a série – N° 234 – 3 de dezembro de 2013 Despacho (extrato) n° 15793-F/2013, 2013)	102
Figura 48: Representação das zonas de clima mediterrânico do tipo Csb (Fonte: (IPMA (Instituto Português do Mar e do Atmosfera, 2023))	103
Figura 49: Medições da radiação solar em quatro pontos de recolha de dados (A - PC1; B - PC2; C - PC3; D - PC4).....	126
Figura 50: Comparação entre o piranómetro de termopilha e os outros dois sensores (piranómetro de silício (laranja) e medidor de radiação solar (azul))	127
Figura 51: Ilustração dos valores de albedo usados no estudo de caso	135
Figura 52: Ilustração dos valores de albedo usados no PC1 do estudo de caso.....	136
Figura 53: Forma original variação A.....	140
Figura 54: Níveis de ruído na fachada a) orientação N-O b) orientação S-E	142
Figura 55: Radiação na fachada a) orientação O-S b) orientação O-N.....	143
Figura 56: Análise comparativa entre ruído e radiação por fachada: Variação A	144
Figura 57: Forma original variação B.....	145
Figura 58: Níveis de ruído na fachada a) orientação O-S b) orientação E-N	146
Figura 59: Radiação na fachada a) orientação O-S b) orientação O-N.....	147
Figura 60: Análise comparativa entre ruído e radiação por fachada: Variação B	148
Figura 61: Forma original variação C	149
Figura 62: Níveis de ruído na fachada a) orientação O-S b) orientação S-E.....	150
Figura 63: Radiação na fachada a) orientação S-E b) orientação N-O	151
Figura 64: Análise comparativa entre ruído e radiação por fachada: Variação C	152
Figura 65: Forma original variação D	153
Figura 66: Radiação na fachada a) orientação S-E b) orientação N-O	154
Figura 67: Radiação na fachada a) orientação O-S b) orientação N-O.....	155
Figura 68: Análise comparativa entre ruído e radiação por fachada: Variação D	156
Figura 69: Forma original variação E.....	157

Figura 70: Níveis de ruído na fachada a) orientação O-S b) orientação S-E.....	158
Figura 71: Radiação na fachada a) orientação O-S b) orientação N-O.....	159
Figura 72: Análise comparativa entre ruído e radiação por fachada: Variação E	160
Figura 73: Comparativo entre as 5 Variações (A, B,C,D e E) em termos de radiação e ruído	162
Figura 74: Ilustração da variação A	165
Figura 75: Representação da classificação perante a via. Fonte: (Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d'application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3, 2016)	174
Figura 76: Representação do obstáculo perante a via. Fonte: (Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d'application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3, 2016)	175
Figura 77: Representação do obstáculo em altura. Fonte: (Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d'application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3, 2016).....	176
Figura 78: Ilustração da variação A	215
Figura 79: Ilustração da variação B.....	223
Figura 80: Ilustração da variação C.....	228
Figura 81: Ilustração da variação D.....	233
Figura 82: Ilustração da variação E	241

Lista de Tabelas

Tabela 1: Casos de Estudo de Sombreamento Acústico.....	26
Tabela 2: Casos de Estudo de Sombreamento Acústico (continuação)	27
Tabela 3: Softwares de cálculo de sombreamento acústico	28
Tabela 4: Softwares de cálculo de sombreamento acústico (continuação)	29
Tabela 5: Softwares de cálculo de sombreamento acústico (continuação)	30
Tabela 6: Caso de estudo sobre sombreamento solar	38
Tabela 7: Caso de estudo sobre sombreamento solar (continuação)	39
Tabela 8: Caso de estudo sobre sombreamento solar (continuação)	40
Tabela 9: Listagem comparativa dos diferentes métodos de cálculo de sombras disponíveis no mercado (Adaptado:(Carreira, 2017)	42
Tabela 10: Listagem comparativa dos diferentes métodos de cálculo de sombras disponíveis no mercado (continuação) (Adaptado:(Carreira, 2017)	43
Tabela 11: Valores do fator de sombreamento do horizonte Fh na estação de aquecimento para Portugal Continental (Adaptado de:(Ministério da Economia e do Emprego, 2013))	47
Tabela 12: classificação da categoria de infraestrutura de transporte terrestre Fonte:(IZUBA, 2024) ..	60
Tabela 13: Relação de Categoria de Infraestrutura com os níveis de ruído e isolamento acústico mínimo Fonte: (Ministère du Partenariat avec les territoires et de la Décentralisation 2020)	61
Tabela 14: Valores dos Indicadores de Forma	81
Tabela 15: Níveis de ruído nas fachadas dos edifícios	84
Tabela 16: Índice de Compacidade e radiação solar por forma selecionada no período de aquecimento e níveis de ruído exposto	89
Tabela 17: Índice de Porosidade e radiação solar por forma selecionada no período de aquecimento e níveis de ruído exposto	90
Tabela 18: Índice de Complexo de Perímetro e radiação solar por forma selecionada no período de aquecimento e níveis de ruído exposto	92
Tabela 19: Representação fotográfica do local de estudo e da sua envolvente e do equipamento de medição	101
Tabela 20: Equipamentos necessário para a medição de ruído.....	105
Tabela 21: Resumo de desempenho dos equipamentos de medição de acordo com o fabricante.....	107
Tabela 22: Medição do Ruído nos Pontos de Validação	116
Tabela 23: Medição do Ruído nos Pontos de Validação (continuação)	117
Tabela 24: Medição do Ruído nos Pontos de Validação (continuação)	118
Tabela 25: 1ª Validação (Valores medidos vs valores modelados)	118
Tabela 26: 1ª Validação (Valores medidos vs valores modelados) (continuação)	119
Tabela 27: Ponto de validação (medição e simulação) (continuação)	120
Tabela 28: Pontos de Medição da Radiação solar in situ.....	122
Tabela 29: Pontos de Medição da Radiação solar in situ.....	123
Tabela 30: Pontos de Medição da Radiação solar in situ.....	124
Tabela 31: Pontos de Medição da Radiação solar in situ.....	125
Tabela 32: Diferencial dos Pontos Simulados e dos Pontos Medidos (PC1) e (PC2)	130
Tabela 33: Diferencial dos Pontos Simulados e dos Pontos Medidos (PC3) e (PC4)	131
Tabela 34: O diferencial da média do erro percentual foi calculado para os dois equipamentos de medição (piranómetros)(PC1)	133

Tabela 35: O diferencial da média do erro percentual foi calculado para os dois equipamentos de medição (piranómetros)(PC2)	133
Tabela 36: O diferencial da média do erro percentual foi calculado para os dois equipamentos de medição (piranómetros)(PC3)	133
Tabela 37: O diferencial da média do erro percentual foi calculado para os dois equipamentos de medição (piranómetros)(PC4)	133
Tabela 38: Valores de Albedo do estudo de caso	135
Tabela 39: Forma original variação A (análise de ruído)	141
Tabela 40: Forma original variação A (análise de radiação)	142
Tabela 41: Forma original variação B (análise de ruído)	146
Tabela 42: Forma original variação B (análise de radiação)	147
Tabela 43: Forma original variação C (análise de ruído)	150
Tabela 44: Forma original variação C (análise de radiação)	151
Tabela 45: Forma original variação D (análise de ruído)	154
Tabela 46: Forma original variação D (análise de radiação)	155
Tabela 47: Forma original variação E (análise de ruído)	158
Tabela 48: Forma original variação E (análise de radiação)	159
Tabela 49: Comparativos das outras variações em relação à forma original A	164
Tabela 50: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Orua- Orientação Oeste)	166
Tabela 51: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Epátio - Orientação Este)	166
Tabela 52: Variação A (análise por fachada e por piso)(fachada Nrua - Orientação Norte))	167
Tabela 53: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio – Orientação Sul)	167
Tabela 54: Classificação da distância em relação à fonte de ruído Fonte: (Arrêté du 28 décembre 2012)	173
Tabela 55: Classificação BR: Infraestrutura de Categoria 1. Fonte:(Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d’application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3, 2016)	176
Tabela 56: Classificação BR: Infraestrutura de Categoria 2. Fonte:(Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d’application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3, 2016)	176
Tabela 57: Classificação BR: Infraestrutura de Categoria 3. Fonte:(Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d’application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3, 2016)	177
Tabela 58: Classificação BR: Infraestrutura de Categoria 4. Fonte:(Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d’application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3, 2016)	177
Tabela 59: Classificação BR: Infraestrutura de Categoria 5. Fonte:(Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d’application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3, 2016)	177
Tabela 60: Classificação Categoria CE1 e CE2 Fonte: (RT-2012.com, 2013)	179
Tabela 61: O estudo das cinco variações (análise global)	185
Tabela 62: Análise do ruído nas fachadas (considerando 4 classes de exposição ao ruído)	186
Tabela 63: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)	215
Tabela 64: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Epátio)	216
Tabela 65: Variação A (análise por fachada e por piso)(fachada Nrua)	216
Tabela 66: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio)	217
Tabela 67: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)	217
Tabela 68: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Opátio)	218
Tabela 69: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Srua)	218
Tabela 70: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Npátio)	219
Tabela 71: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)	219

Tabela 72: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Nrua)	220
Tabela 73: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio)	220
Tabela 74: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)	221
Tabela 75: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Opátio)	221
Tabela 76: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Srua)	222
Tabela 77: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Npátio)	222
Tabela 78: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Srua)	223
Tabela 79: Variação B (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)	224
Tabela 80: Variação B (análise por fachada e por piso) (fachada Epátio)	225
Tabela 81: Variação B (análise por fachada e por piso) (fachada Nrua)	225
Tabela 82: Variação B (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio)	226
Tabela 83: Variação B (análise por fachada e por piso) (fachada Srua)	226
Tabela 84: Variação B (análise por fachada e por piso) (fachada Npátio)	227
Tabela 85: Variação B (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)	227
Tabela 86: Variação B (análise por fachada e por piso) (fachada Opátio)	228
Tabela 87: Variação C (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)	229
Tabela 88: Variação C (análise por fachada e por piso) (fachada Nrua)	229
Tabela 89: Variação C (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio)	230
Tabela 90: Variação C (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)	230
Tabela 91: Variação C (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)	231
Tabela 92: Variação C (análise por fachada e por piso) (fachada Srua)	231
Tabela 93: Variação C (análise por fachada e por piso) (fachada Npátio)	232
Tabela 94: Variação C (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)	232
Tabela 95: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)	233
Tabela 96: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Epátio)	234
Tabela 97: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Nrua)	234
Tabela 98: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio)	235
Tabela 99: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)	235
Tabela 100: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)	236
Tabela 101: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Srua)	236
Tabela 102: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Npátio)	237
Tabela 103: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)	237
Tabela 104: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Nrua)	238
Tabela 105: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio)	238
Tabela 106: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)	239
Tabela 107: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Opátio)	239
Tabela 108: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Srua)	240
Tabela 109: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Npátio)	240
Tabela 110: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)	241
Tabela 111: Variação E (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)	242
Tabela 112: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Nrua)	242
Tabela 113: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio)	243
Tabela 114: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)	243
Tabela 115: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Opátio)	244
Tabela 116: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Srua)	244
Tabela 117: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Npátio)	245

Tabela 118: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Orua).....	245
Tabela 119: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)	246
Tabela 120: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Srua)	246
Tabela 121: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Npátio)	247
Tabela 122: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Epátio).....	247
Tabela 123: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Orua).....	248
Tabela 124: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Nrua).....	248
Tabela 125: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio).....	249
Tabela 126: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)	249

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, detalham-se as motivações que orientaram a escolha deste tema de investigação, apresenta-se o problema ou oportunidade de estudo, deduz-se as questões de investigação, citam-se os objetivos gerais e os específicos. O programa de trabalhos a desenvolver tem por base os Objetivos da Agenda 2030 das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável (UNDP, 2023). Nomeadamente, responder aos dois objetivos selecionados:

11.3 *By 2030, enhance inclusive and sustainable urbanization and capacity for participatory, integrated and sustainable human settlement planning and management in all countries.*

13.2 *Integrate climate change measures into national policies, strategies and planning.*

13.3 *Improve education, awareness-raising and human and institutional capacity on climate change mitigation, adaptation, impact reduction and early warning.*

1.1. Enquadramento

Os edifícios residenciais, contribuem em Portugal com cerca de 40% do consumo de energia (eletricidade), principalmente no aquecimento e arrefecimento, uso de água quente sanitária, iluminação e uso de equipamentos elétricos (Instituto Nacional de Estatística [INE], 2021). Esses valores têm aumentado nos últimos anos devido à necessidade de maior conforto na habitação. Nesse sentido, foi necessário adotar medidas que promovam a redução do consumo de energia por esse setor e, de preferência, através de soluções passivas e sustentáveis (Agência Nacional de Energia [ADENE], 2021)

Os edifícios multifamiliares têm um consumo de energia elevado por ser construção em altura e o acesso à radiação solar é desigual. Normalmente, os primeiros pisos recebem menos radiação solar em comparação com os outros pisos do edifício. Esse fator tem a ver com a regra de afastamento de 45 graus entre os edifícios, que vai ser a premissa a partir do qual se pretende desenvolver o presente estudo (ADENE, 2021).

O objetivo será avaliar e otimizar a forma urbana em relação à exposição ao ruído do meio envolvente (nomeadamente vias de circulação automóvel) e à radiação solar incidente nas fachadas dos edifícios em função da sua orientação.

No caso português, o Regulamento Geral das Edificações Urbanas (Regulamento Geral das Edificações Urbanas [RGEU], 1951) define a premissa básica de garantir as condições mínimas de luz do sol e iluminação natural dos edifícios, dadas pelo ângulo de afastamento de 45° entre os edifícios, ilustrado na Figura 1.

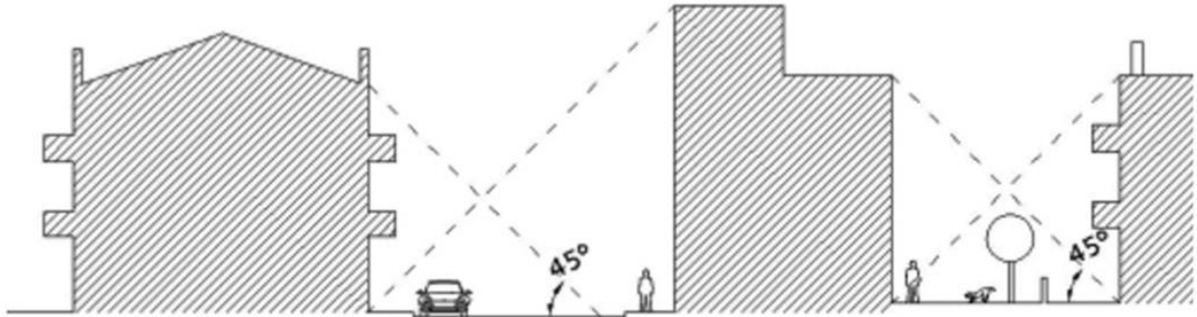


Figura 1: Ilustração do afastamento entre fachadas previsto nos artigos 59.º a 62.º do RGEU

A fim de otimizar os ganhos de energia do edifício, pretende-se aprofundar o modo como a exposição solar, particularmente a incidente nas fachadas dos edifícios, é influenciada pelo layout da forma urbana e verificar quais os layouts urbanos que permitem ganhos térmicos.

Por outro lado, analisar em simultâneo o impacto que o layout da forma urbana tem na propagação do ruído e por conseguinte como este chega à fachada do edifício. O objetivo é chegar a uma situação de compromisso entre otimização térmica e acústica do edificado.

A sustentabilidade da forma urbana passa pela otimização dos ganhos solares e pela redução da incomodidade devida ao ruído. É na relação dos três fatores e na descoberta dos parâmetros que mais influenciam os ganhos ou perdas dessa correlação que o estudo proposto se desenvolve.

1.2. Motivação

Achou-se pertinente averiguar as “energias” associadas à habitação e destacou-se a térmica e a acústica como sendo as que mais influenciam o conforto de uma habitação.

O estudo proposto vai no sentido de descobrir como estas três componentes (forma urbana, radiação solar e ruído urbano) se relacionam e descobrir quais os pontos ótimos na sua relação, bem como o compromisso necessário para essa otimização, que o esquema da Figura 2 retrata.

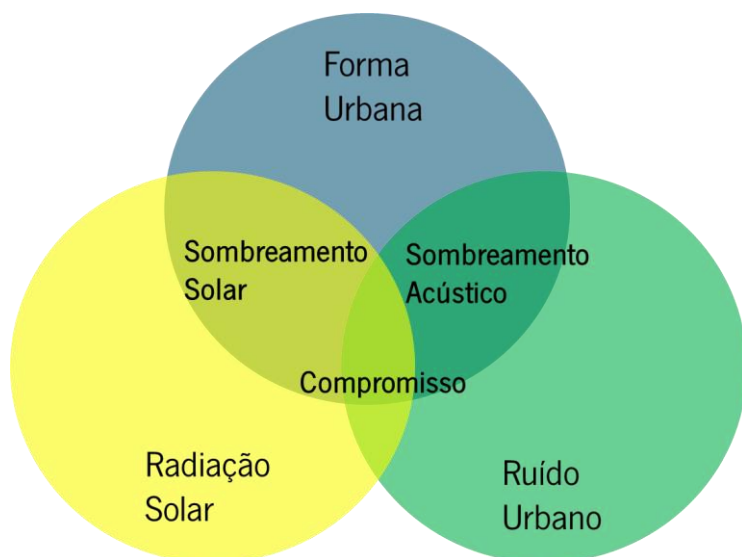


Figura 2: Esquema representativo das correlações do estudo pretendido

1.3. Oportunidade de estudo

Este estudo pretende introduzir a questão da relação entre radiação solar e o ruído, em meio urbano. Tem como objetivo dar um contributo para permitir relacionar ambas as questões com os respetivos regulamentos nacionais e ver a sua aplicabilidade (Regulamento Geral de Ruído, o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios e o Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação). O estudo visa identificar de que forma a otimização do comportamento acústico podem entrar em conflito com a otimização dos ganhos térmicos do edifício e vice-versa.

Exemplificando, numa fachada envidraçada virada a Sul seria pertinente abrir o máximo de área de exposição solar para otimizar os ganhos térmicos por radiação, no entanto se a principal fonte sonora (infraestrutura viária) estiver localizada igualmente a sul seria pertinente reduzir a área de aberturas de forma a otimizar (neste caso reduzir) a transmissão e a exposição ao ruído, como é possível verificar, existe uma solução que entra em conflito com a outra. Nesse contexto, o projetista terá que tomar uma decisão que acaba por ser um compromisso entre otimizar a resposta térmica ou a acústica com o objetivo final de aumentar o conforto global do edifício.

Nesse sentido, seria pertinente estudar as premissas com maior impacto nos ganhos solares e nos ganhos acústicos, nomeadamente a orientação (à fonte sonora e solar) e o sombreamento (acústico e térmico).

1.4. Questões de investigação

Face ao exposto pretende-se estudar:

Quais as formas urbanas que proporcionam uma otimização da exposição solar na estação de aquecimento e o sombreamento acústico?

Como pode a forma urbana, em particular a regra dos 45° definida no RGEU, influenciar o sombreamento solar e acústico?

Como integrar os requisitos acústicos (proteção ao ruído) nas exigências de exposição solar dos regulamentos térmicos?

Qual a relação de compromisso entre requisitos térmico-acústicos na sustentabilidade da forma urbana?

1.5. Objetivos

Objetivos gerais

O estudo vai ao encontro dos “Objetivos da Agenda 2030 das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável” ao averiguar a necessidade de compatibilizar a eficiência energética das formas urbanas com a exposição ao ruído e compatibilizar a sua aplicabilidade aos regulamentos associados.

De forma a otimizar os ganhos energéticos do edifício, pretende-se aprofundar o modo como a exposição solar, particularmente a incidente nas fachadas do edificado, é influenciada pela disposição da forma urbana e averiguar quais os layouts urbanos que permitem adequados ganhos térmicos na estação de aquecimento. Paralelamente, pretende-se avaliar o impacto que a disposição da forma urbana tem no modo como o ruído se propaga e como este é quantificado particularmente nas fachadas do edificado.

Estudar quais as premissas e as exigências que os regulamentos acarretam e descobrir as formas urbanas que se adequam simultaneamente a uma otimização dos requisitos térmicos e acústicos, validando as mesmas através de medições de radiação solar e ruído nas fachadas dum estudo de caso.

O objetivo geral desta tese é investigar a compatibilização entre o sombreamento acústico e a exposição solar para uma forma urbana mais sustentável.

Objetivos específicos

Estudar as formas urbanas que promovam o sombreamento acústico e como este é benéfico para a redução da incomodidade ao ruído (primeiramente pelo estudo preliminar) e averiguar quais as fachadas que retratam essa redução ou aumento de níveis de exposição ao ruído (segundamente pela análise de sensibilidade do estudo de caso).

Medir a radiação solar que chega às fachadas, simular em software tridimensional diferentes cenários que possam permitir avaliar e medir em situação real (estudo de caso) e em paralelo comparar com o ruído que chega à mesma fachada.

Averiguar, a partir duma análise de sensibilidade, o comportamento do edificado, face à exposição ao ruído, mas sobretudo à radiação solar. Nomeadamente, comprovar como a envolvente da forma urbana (ângulo de 45° entre edifícios), pode influenciar e criar sombreamento solar, impedindo a otimização da radiação na estação de aquecimento (na orientação solar, a sul), sobretudo nos primeiros pisos, onde a exposição solar é menor.

Analisar a partir do caso de boas práticas (regulamento térmico francês), os parâmetros e as relações de compromisso térmico-acústico. Por último, refletir como o compromisso térmico-acústico pode promover a sustentabilidade urbana e como esta poderá proporcionar ainda em fase de projeto uma eficiência energética solar e sonora, através de soluções passivas.

1.6. Estrutura da tese

Este trabalho encontra-se dividido em nove capítulos: Introdução; Estado da Arte, Metodologia, Estudo Preliminar, Estudo de Caso, Análises, Considerações Finais, Desenvolvimentos Futuros e Referências Bibliográficas. Na Introdução expõe-se a extensão da investigação e o seu âmbito.

No segundo capítulo, o Estado de Arte, como o próprio nome indica será apresentada a revisão bibliográfica sobre os temas de investigação e suas áreas científicas conexas. No terceiro capítulo, apresenta-se a Metodologia de Investigação, onde se delineia a filosofia, a metodologia e os processos propostos a utilizar no estudo de caso, apresentando um estudo preliminar com as premissas necessárias à tomada de decisão no estudo de caso.

No capítulo quatro é apresentado o estudo de caso com as medições e simulações efetuadas na Cidade Viana do Castelo. No capítulo cinco são discutidos os resultados do estudo de caso e proposto um compromisso entre sombreamento solar e acústico. Por último, apresentam-se algumas considerações finais. No último ponto, encontram-se as Referências bibliográficas ordenadas alfabeticamente.

2. ESTADO DA ARTE

A importância da forma urbana no desenvolvimento sustentável tem sido reconhecida nos últimos anos. Desde o fim do século XX que vários países têm adotado políticas de forma urbana no planeamento ambiental (National Physical Planning Agency, 1991) , reconhecendo o impacto da forma urbana na sustentabilidade de uma cidade. Alawadi (2017) considera que não é nova a questão da “melhor” forma urbana para ambientes sustentáveis avaliando os inúmeros estudos efetuados ao longo dos últimos anos sobre a temática.

2.1. Forma Urbana

Segundo Luz Valente Pereira (1982) a forma urbana define-se num dado solo ou paisagem pela relação estabelecida entre espaço exterior e massa edificada. São as relações estabelecidas nas diferentes camadas e sistemas (edificado, não edificado...) em si e entre si e nas suas relações com outros elementos do sistema urbano (localização, topografia ou exposição solar) que a forma urbana define.

A influencia da forma urbana (massa edificada) na composição da paisagem urbana relaciona-se com a caracterização morfológica da massa edificada (definição tipológica dos edifícios, das formas de agregação, dos edifícios, do modo de acesso e a definição dos espaços exteriores entre os conjuntos edificados)(Oliveira & Silva, 2010; Oliveira & Silva, 2012; Silva *et al.*, 2014). A forma urbana é definida por um conjunto de elementos que definem o layout urbano e o que lhe é intrínseco (Oliveira, 2011).

2.1.1. Importância da forma urbana na sustentabilidade de uma cidade (smart city)

Como tornar as formas urbanas vocacionadas para o conceito das *smart cities* (Papa *et al.*, 2015) e simultaneamente responder aos conceitos e aos desígnios da sustentabilidade? Segundo Bibri (2017), os debates contemporâneos sobre a sustentabilidade do planeamento urbano continuam focados em responder aos desafios do rápido crescimento e evolução das formas urbanas e à insustentabilidade das existentes. Por outro lado, considera pertinente a associação dos impactos ambientais, aos económicos e aos sociais; e como o ambiente construído e seu estudo de forma minimiza a insustentabilidade do uso de energia a longo termo (Bibri & Krogstie, 2017).

O conceito de *smart city*, está intrinsecamente ligada ao sistema de informação (Albino *et al.*, 2015; Batty *et al.*, 2012; Caragliu *et al.*, 2011). O conceito é quanto mais informação está ao alcance, mas inteligente será a decisão tomada (Ahvenniemi *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2018).

Segundo Macke, Rubim Sarate and de Atayde Moschen (2019) “(...) as cidades podem ser sustentáveis sem inteligência (...)”, e as tecnologias inteligentes podem ser usadas sem considerar o desenvolvimento sustentável (Cohen, 2006, Höjer e Wangel, 2015, Rostami *et al.*, 2015, Han *et al.*, 2017, Blewitt 2018)) e na combinação de ambos surge o conceito de cidade sustentável inteligente (Yigitcanlar *et al.*, 2019).

Quanto mais variáveis se conhecerem mais se reduzem os efeitos não previstos numa tomada de decisão e toda a tomada de decisão é feita num dado contexto (urbano, geográfico, económico e temporal). Todo o sistema é baseado em premissas e processos pré-planeados ou aprovados (Ben Letaifa, 2015) e como o planeamento urbano é processado para um determinado contexto espaço-temporal gera uma dose de incerteza e de projeção (Angelidou, 2014).

A política urbana posiciona o desenvolvimento urbano inteligente como processo “smart” transformado para a sustentabilidade (Martin *et al.*, 2019), onde as decisões serão na base do processo de conceção e de decisão e o processo de abordagem será no sentido de usar indicadores *smart* ou escolher premissas que automatizem as decisões em formato *smart*. As premissas que necessitam de coabitar são as relacionadas com os desafios económicos, sociais e ambientais, em especial a mobilidade e as relacionadas com a otimização da forma urbana (De Jong *et al.*, 2015).

Os objetivos conceituais ligados à sustentabilidade vão no sentido de introduzir hábitos inteligentes, monitorizar a implementação e evolução dos processos de decisão na implementação de formas urbanas e cidades sustentáveis (*smart*) (Comissão Europeia, 2012) como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (SDGs) (Sachs, 2013).

O conceito de cidade sustentável está associado a resultados técnicos (Merline & Vimalathithan, 2017), à eficácia urbana (Natanian & Auer, 2018) ou a impactos de sustentabilidade (Bulkeley & Betsill, 2005; Chastenet *et al.*, 2016; Höjer & Wangel, 2014; Nevens *et al.*, 2013).

Os planos urbanos densos e funcionalmente diversos, para terem um desempenho ambiental sustentável necessitam de um design integrado de serviços e tecnologias sustentáveis (Wilde & van den Dobbelsteen, 2004) ou um planeamento de políticas - para o desenvolvimento de cidades inteligentes e sustentáveis (Macke *et al.*, 2019).

Outro conceito ligado ao planeamento sustentável e *smart cities* é a noção de *governancy*, que ora gera ora decide sobre determinado sistema urbano, pois é na aplicabilidade da proposta que os resultados poderão ser testados com ou sem eficiência (Castro *et al.*, 2008).

A validade da proposta entra por vezes em confronto com a premissa política – legislativa, onde a tomada de decisão pode ocorrer independentemente de a proposta executada ter sido a melhor opção técnica (Merline & Vimalathithan, 2017). A falta de interação entre sistemas, inclusive a legislação poderá acrescentar por excesso ou por omissão, incongruências que dificultam a otimização das soluções, neste caso a redução energética ou a sustentabilidade urbana.

A cidade sustentável inteligente segundo a definição de Brundtland (Sneddon *et al.*, 2006) é uma cidade que deve levar em consideração as necessidades de seus cidadãos, sem prejudicar as gerações futuras mas atender às suas necessidades recorrendo a Tecnologias de Informação e Comunicação inteligentes (Caragliu *et al.*, 2011; Kramers *et al.*, 2014).

O conceito de cidade sustentável é ambíguo (Gardner, 2016; Murphy, 2012; Yigitcanlar *et al.*, 2019) por não ser fácil o seu enquadramento e amplitude, no entanto seus objetivos são claros e relacionam-se com a implementação de políticas mais ecológicas e estratégias regenerativas ambientais que visem impactos negativos menores (Cohen, 2006; Gonçalves & Graça, 2004; Newman & Jennings, 2008).

2.1.2. Políticas urbanas de sustentabilidade e de energia na União Europeia

Em 1987, no Relatório de Brundtland, surgiu o conceito de Desenvolvimento Sustentável que pretendia promover para as gerações presentes e futuras a resolução das alterações na qualidade ambiental, no desenvolvimento económico e na estrutura social. Foi a partir deste contexto que se tornou evidente a necessidade de compromisso por parte da sociedade para com um estilo de vida mais sustentável (World Commission on Environment and Development, 1987).

Em 1991, com a formulação do Tratado da União Europeia (EU), em Maastricht, o conceito de desenvolvimento sustentável foi institucionalizado no Artigo 2º como um objetivo abrangente na política comunitária da União Europeia (UE).

O Urban Environmental Expert Group (UEEG), juntamente com a Comissão Europeia (CE), promoveram o projeto “Cidades Sustentáveis” (Sustainable Cities project), com o objetivo de suscitar novas ideias, princípios e políticas de integração de sustentabilidade urbana na Europa. Este grupo, publicou em 1996, o relatório “Cidades Sustentáveis” (Sustainable Cities report) onde apresentou os princípios do desenvolvimento sustentável e a criação de mecanismos de integração nas políticas locais e a promoção de trocas de experiência e de boas práticas (Silva, 2007).

A União Europeia e seus Estados-Membros como parceiros da Nações Unidas Habitat, implementaram na Nova Agenda Urbana, um compromisso para tornar as cidades de todo o mundo mais inclusivas, verdes, seguras e prósperas (European Commission, 2018a).

A Nova Agenda Urbana que tem como objetivo atender as três metas, nomeadamente realizar a nova agenda urbana através da agenda urbana da UE, desenvolver uma definição global e harmonizada de cidades e promover a cooperação entre cidades no campo do desenvolvimento urbano sustentável (European Commission, 2018b).

Em 2016, na conferência Habitat III foram apresentadas as três metas da Nova Agenda Urbana, a fim de aproveitar o poder da rápida urbanização e permitir o crescimento da cooperação entre cidades a um nível global. A UE tomou a iniciativa no caminho para o desenvolvimento urbano sustentável com a implementação contínua de sua Agenda Urbana para a UE e na Figura 3 representa-se essa evolução e participação a uma escala global.

THE GLOBAL DEVELOPMENT FRAMEWORK

Growing recognition of urbanization reflected in global frameworks for sustainable global development.

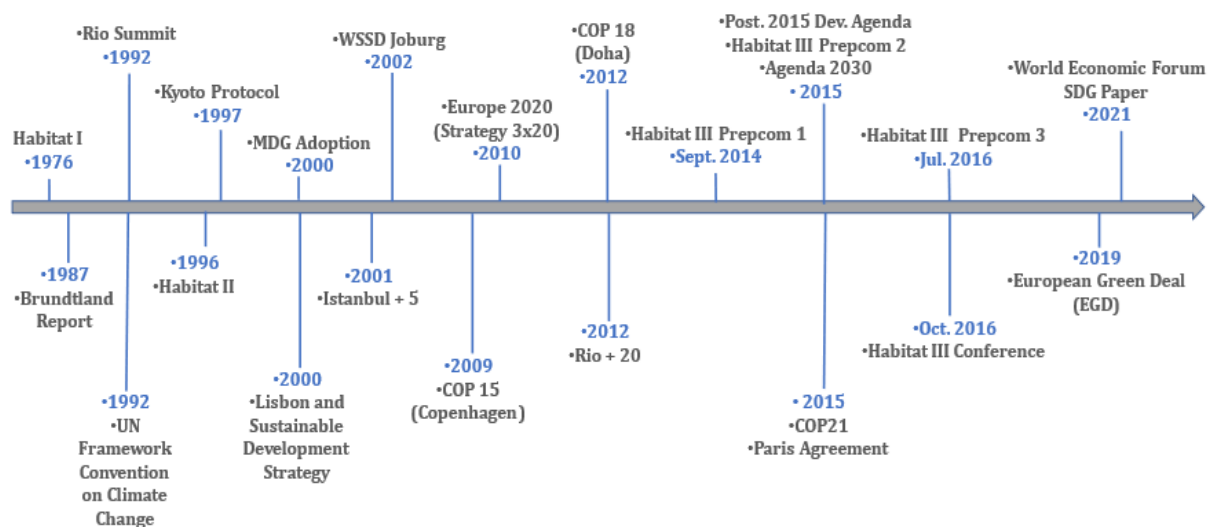


Figura 3: Evolução dos planos de desenvolvimento sustentável mundial (Adaptado de: (UN, 2017))

A Nova Agenda Urbana tornou-se um pilar na implementação da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável entre outras reformas impactantes como a estratégia Europa 2020 ou o Acordo de Paris.

Em 2010 foi lançada a estratégia Europa 2020 que definiu cinco objetivos principais a atingir até ao final de 2020, sendo um deles relacionado com o clima/energia. Nomeadamente a redução em 20% das emissões de GEE (relativamente a 1990), a obtenção 20% da energia a partir de fontes renováveis e o aumento em 20% da eficiência energética (European Commission, 2010).

O Acordo de Paris (4 de novembro de 2016) foi uma das inúmeras iniciativas na tentativa de combater eficazmente as alterações climáticas, através da **redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE)** e a definição dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável para 2030.

Em 2018, a Comissão Europeia com o objetivo de assegurar o compromisso da Europa na liderança das ações climáticas propõe o plano estratégico de longo prazo para a economia em 2050 – “A Clean Planet for All”. A visão proposta pela CE é obter emissões próximas do zero de GEE até 2050, de forma justa (socialmente) e eficiente (economicamente e ambientalmente)(European Commission, 2018a).

2.1.3. Políticas urbanas de sustentabilidade e energia em Portugal

O desenvolvimento urbano sustentável em Portugal passa pela promoção de cidades inteligentes, competitivas e atrativas para o habitante e para a economia, e foi nesse sentido que em 2015, o Conselho de Ministros aprovou a estratégia Cidades Sustentáveis 2020 (Cavaco *et al.*, 2015).

A estratégia Cidades Sustentáveis 2020 define que as cidades deverão assumir um compromisso com a eficiência ecológica (ecoeficiência) com o intuito de reduzir a pegada ecológica e carbónica e conscientizar para um uso equilibrado dos sistemas e subsistemas de cada cidade (Cavaco *et al.*, 2015).

Em particular, assegurar e promover a conciliação das atividades poluidoras com a qualidade ambiental, melhorar o envelope acústico dos edifícios e espaços públicos e assegurar a redução da intensidade energética das cidades, assumindo a qualidade da saúde pública.

O modelo de desenvolvimento urbano sustentável proveniente da estratégia Cidades Sustentáveis 2020 potencia a eficiência dos seus subsistemas (energia, mobilidade, água e resíduos) e visa melhorar a capacidade de resposta aos riscos e aos impactos, provenientes das alterações climáticas (Cavaco *et al.*, 2015).

A Estratégia Nacional para a Energia com um horizonte de 2020 (Aprovada na Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010) definiu uma agenda para a promoção das energias renováveis e da eficiência energética, com o intuito de promover a sustentabilidade económica e ambiental na redução das emissões de CO₂ a nível nacional e global.

Em 2013, a Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013, aprovou o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) para o período 2013-2016 e o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER) para o período 2013-2020.

O Programa Nacional para as Alterações Climáticas 2020/2030 (PNAC 2020/2030), tinha como objetivos diligenciar a transição para uma economia de baixo carbono, pretendia garantir o cumprimento das metas nacionais em termos de alterações climáticas e assegurar um meio sustentável na redução das emissões de GEE.

2.1.4. Relação da forma urbana com a exposição ao ruído urbano

Estudos que abordam a interação da forma urbana com o ruído são relativamente recentes. Neste contexto, Villaverde, Hornero e Ravé (2014) analisaram a relação entre ruído e altura do edifício e largura da rua (H / W). Outros autores encontraram uma correlação entre ambos e concluíram que a Geometria influencia a distribuição espacial do ruído (Oliveira & Silva, 2012; Silva *et al.*, 2018).

Muitos estudos abordam o efeito de irregularidades nas fachadas e, assim, analisam a difusão sonora nas ruas (Ismail & Oldham, 2005; Onaga & Rindel, 2007; Picaut, J., & Scouarnec, 2009; Picaut & Simon, 2001). Heutschi (1995) compilou tabelas de consulta para avaliar o aumento do nível de ruído do tráfego rodoviário devido aos edifícios, incluindo aberturas, levando em consideração a altura das fachadas, a largura do “canyon”, o coeficiente de absorção das fachadas e o grau de difusão.

A influência do desenho do edifício e cobertura em fachadas não expostas diretamente ao ruído foi estudada em detalhe por diferentes autores (Hornikx *et al.*, 2005; Hornikx & Forssén, 2009; Van Renterghem *et al.*, 2006, 2013; Van Renterghem & Botteldooren, 2010) dada a pertinência em obter fachadas silenciosas num dado ambiente urbano (Kluizenaar *et al.*, 2011; Öhrström *et al.*, 2006; Van Renterghem, T; Botteldooren, 2012). O estudo de diferentes formas de cobertura na propagação sonora (Van Renterghem & Botteldooren, 2010), traz conclusões interessantes para alcançar fachadas silenciosas através do projeto arquitetônico.

Outros autores (Guedes *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2014a) concluíram que as características físicas da forma urbana, tais como a densidade de construção, a existência de espaços abertos e a forma e posição física dos edifícios, têm uma influência significativa no ruído ambiente.

Outros elementos que podem influenciar a propagação do ruído que chega às fachadas são as varandas, por constituírem elementos que promovem a formação de sombra acústica, a sua presença e forma já foram estudadas. Nomeadamente El Dien (2004) , concluiu que a forma do parapeito e a profundidade da varanda influenciam o campo sonoro ao longo das fachadas de edifícios altos e considera que estes elementos deverão ser considerados pelos arquitetos aquando da conceção da forma urbana (Dien & Woloszyn, 2005; Dien & Woloszyn, 2004).

Borrego *et al.* (2006) considera as avaliações de ruído ambiental por meio de mapeamento e predição acústica úteis, por permitirem visualizar e quantificar o ruído ambiental, contribuindo para um adequado ambiente sonoro urbano (Silva, 2009; Silva & Mendes, 2012). No entanto, a geometria da forma urbana tem também um impacto considerável no desempenho ambiental, incluindo o conforto térmico (Jamei *et al.*, 2016) ou a radiação solar (Chatzipoulka *et al.*, 2016).

Apesar de a literatura fornecer pouca informação sobre a influência da geometria do ruído de tráfego (Echevarria Sanchez *et al.*, 2016), o carácter inovador do estudo é evidenciado pela integração de técnicas emergentes, nomeadamente software de simulação e modelação de ruído, com o intuito de explorar melhor a complexidade da forma urbana, de forma a minimizar os seus efeitos na propagação do ruído (Oliveira, 2011; Oliveira & Silva, 2011; Silva *et al.*, 2014b).

Magrini e Lisot,(2016) desenvolveram um modelo para investigar a influência das configurações dos edifícios e o potencial de algumas soluções na redução do ruído nas fachadas dos edifícios. Souza e Giunta (2011) estudaram a importância da relação entre o ruído urbano e o indicador de espaço FSI (*Floor Space Index*) a partir dum modelo de Redes Neurais Artificiais.

2.1.5. Relação da forma urbana e a exposição à radiação solar

Num contexto urbano atual, Vartholomaios (2017) considera a relação entre forma, o clima e o consumo de energia (residencial) um tópico vago para muitos profissionais de planeamento e design apesar da sua pertinência.

Ko, (2013) e Vartholomaios (2015) consideram nas suas revisões de literatura duas abordagens distintas no que concerne a estratégias de projeto urbano com a eficiência energética:

- A primeira vertente aponta para a necessidade de reduzir as cargas de aquecimento, maximizando o uso passivo do sol, onde as formas urbanas são caracterizadas por orientações a sul ou por distâncias mínimas (Dekay & Brown, 2014; R. Knowles, 2006; Montavon, 2010).
- A outra vertente aponta para o uso de blocos urbanos compactos, como os dos centros históricos europeus, onde as densidades urbanas são mais altas e minimizam as

indesejáveis perdas ou ganhos de calor (Curreli & Roura, 2010; Rode *et al.*, 2014a; Taleghani *et al.*, 2013).

Segundo Vartholomaïos (2015) anteriormente estas estratégias podiam ser consideradas incompatíveis mas considera que os estudos mais recentes (Cheng *et al.*, 2006; Knowles, 2006; Ratti *et al.*, 2003; Strømman-Andersen & Sattrup, 2011a) demonstraram que o desenvolvimento de formas urbanas compactas com alto potencial solar passivo é viável.

Apesar da correlação da forma urbana e o uso de energia ser multifacetada, reconhecida e enfatizada em manuais de design (Dekay & Brown, 2014) são poucos os estudos publicados que correlacionam forma urbana e uso de energia (Ko, 2013).

Existem vários estudos que parametrizam fatores ambientais específicos como design da rua e do edifício (Van Esch *et al.*, 2012), densidade urbana (Strømman-Andersen & Sattrup, 2011) ou através de algoritmos (Kämpf & Robinson, 2010). No entanto, não quantificam a energia usada e seu impacto (Martins *et al.*, 2016; Vartholomaïos, 2015).

Na mesma linha de pensamento, a parametrização dos estudos tende a se concentrar nas particularidades da geometria, geralmente na forma da matriz dos edifícios (Cheng *et al.*, 2006; Martins *et al.*, 2016) “canyons urbanos” (Strømman-Andersen & Sattrup, 2011a; Van Esch *et al.*, 2012; Vartholomaïos, 2015) ou blocos urbanos (Kämpf & Robinson, 2010; Vermeulen *et al.*, 2015).

Existem ainda estudos comparativos entre o desempenho energético de blocos com outras tipologias urbanas, ainda que raros e geralmente não considerando o efeito de alterações em parâmetros morfológicos importantes, como a orientação (Rode *et al.*, 2014b), a largura da rua (Quan *et al.*, 2014) ou a forma de bloco urbano (Taleghani *et al.*, 2015) em relação ao consumo de energia.

No entanto, o efeito da geometria urbana e a orientação solar e as condições de sombreamento para diferentes condições de latitude foi estudado ((Bourbia & Awbi, 2004; Emmanuel, 1993; Givoni, 1998; Steemers *et al.*, 1998) enquanto outros estudos correlacionaram o acesso solar, a orientação solar com a densidade urbana, orientação e questões de acesso solar, numa tentativa de investigar as opções de projeto urbano (Capeluto *et al.*, 2005; Coutinho, 2018; R. L. Knowles, 2003; Ratti *et al.*, 2003).

Segundo Vartholomaios (2017), a literatura existente, no que se refere à relação entre forma urbana e uso residencial de energia deixa em aberto ou parcialmente respondido algumas questões no que se refere ao desempenho do bloco urbano em relação a outras tipologias. Nomeadamente se determinada forma urbana pode obter baixos consumos de energia usando simultaneamente abordagens geométricas, morfológicas e mensuráveis? Que características deverão ter as formas urbanas e o que deverão ter em comum em termos de geometria e densidade urbana de modo a serem comparáveis e mensuráveis? Poderá existir alguma tipologia urbana específica que seja preferida em relação às restantes?

2.2. Ruído urbano

A libertação de energia emitida por uma fonte sonora que se propaga sob a forma de ondas mecânicas designa-se de som. A definição onomástica etimológica de som é a variação da pressão atmosférica, em qualquer meio de propagação que o ouvido do ser humano tem capacidade de detetar.

O conceito de ruído é associado à desagradabilidade do som e pode ser caracterizado pela sua frequência (baixa a alta, sons graves a agudos) e pela sua amplitude medida em termos do “Nível de Pressão Sonora” (APA, 2004).

A pressão sonora é a diferença entre a pressão ambiente instantânea relativamente à pressão atmosférica, a partir da qual o ouvido humano é sensível. Assim o ruído é expresso pelo logaritmo da relação entre os quadrados da pressão sonora medida (P_{med}) e a pressão de referência (P_{ref}). Denomina-se nível de pressão sonora L_p e é expresso em Bel (B) ou multiplicando-se por 10 é expresso em decibel (dB) e calculado pela seguinte expressão:

$$L_p = 10 \times \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \times \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad (1)$$

Em que:

L_p é o nível de pressão sonora expresso em dB

p é o valor eficaz da pressão sonora, expresso em Pascal.

p_0 é a pressão sonora de referência e corresponde ao limiar mínimo da audição humana ($p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa)

A escala de valores de nível de pressão sonora varia entre 0 dB e 120 dB que corresponde ao limiar da audição e ao limiar da dor, ilustrado na Figura 4.



Figura 4: Ilustração dos níveis de pressão sonora (Fonte: (Ministère de Territoire, 1978))

O nível de pressão sonora, não representa inteiramente a sensação auditiva humana e a aptidão do ouvido humano perceber ondas sonoras com a mesma energia, mas com distintas frequências é diferente. A gama audível varia entre 20Hz e 20 000Hz e a sensibilidade do ouvido diminui para gamas abaixo dos 500Hz (infrasons) e acima dos 4000 (ultrasons) como é ilustrado na Figura 5.

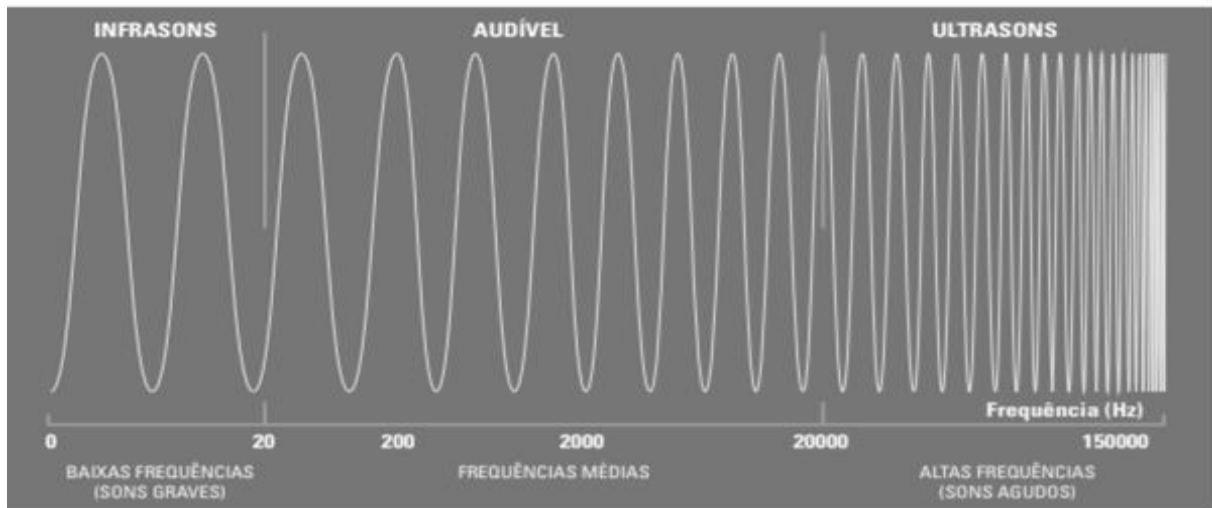


Figura 5: Ilustração da gama de frequências (Fonte: (Ministère de Territoire, 1978))

O nível de pressão sonora face ao exposto deve, então, ser ponderado por um coeficiente dependente da frequência, por forma a ter em linha de conta a diferente sensibilidade auditiva humana à frequência. Nesse sentido, foram estabelecidas curvas de ponderação A, B, C e D ilustradas no gráfico da Figura 6, que permitam caracterizar o nível de pressão sonora recebido pelo ouvido humano.

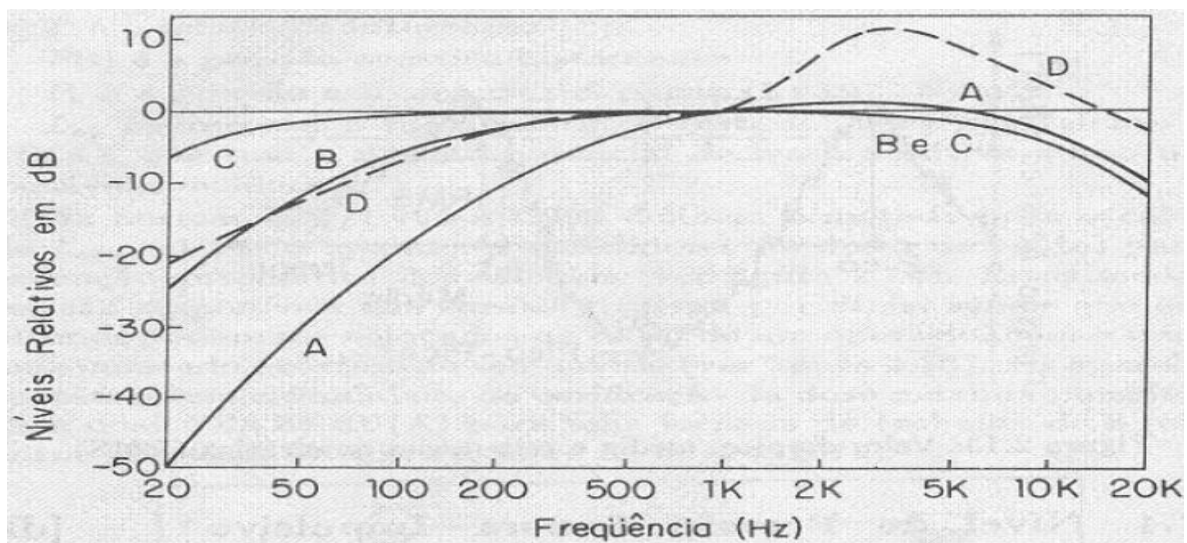


Figura 6: Ilustração das curvas de ponderação de frequência (Fonte: (Gerges, 1992))

A curva de ponderação A é a mais usada por ser a que melhor correlaciona os valores medidos com a percepção do ouvido, a ponderação B destina-se aos sons de média intensidade e de médias frequências, a ponderação C destina-se a alta intensidade sonora e a elevada potência e a ponderação D é especial ao ser usada em medições de sons originários de aeronaves.

Como o ouvido humano é mais sensível a certas frequências do que a outras, o nível de distúrbio é dependente do conteúdo espectral do ruído e a percepção do ruído varia consoante o indivíduo, a localização e o momento e nesse sentido torna-se difícil determinar objetivamente a incomodidade (Silva, 2007a).

2.2.1. Sombreamento acústico

O sombreamento acústico, sombras acústicas ou áreas sombra são espaços nos quais algumas áreas de frequência de som são atenuadas, normalmente causado pelos efeitos de difração, à medida que a onda sonora passa pelas bordas de um dado obstáculo (edifício, barreira...) criando junto ao obstáculo uma área de atenuação ao ruído (Figura 7).

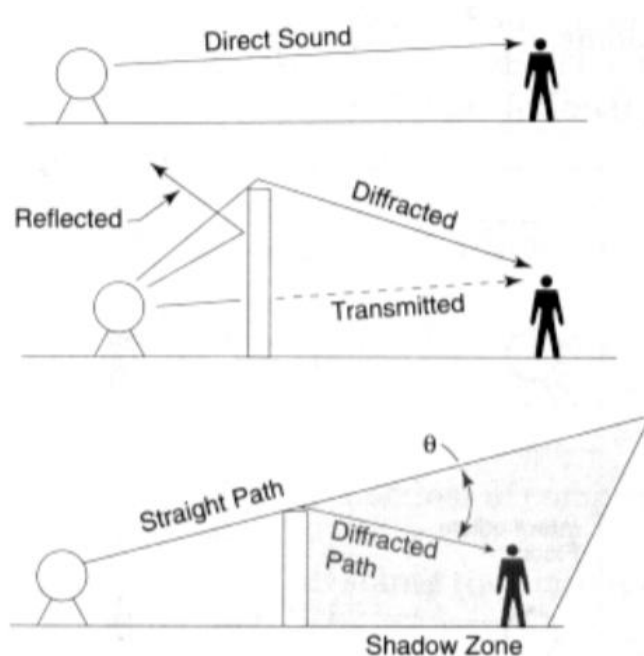


Figura 7: Ilustração do efeito sonoro e a criação da área sombra (Fonte: (Hannah, 2006))

No percurso da onda sonora entre a fonte (tráfego automóvel) até a um recetor (edifícios), perante um obstáculo (barreira ou edifício), as ondas sonoras são difratadas no topo do obstáculo, criando uma "zona de sombra" na sua parte posterior onde os níveis de ruído são mais reduzidos (Silva, 2007a).

O sombreamento acústico comporta-se como uma área protegida ao ruído, não querendo dizer ausência de ruído, mas sim que o ruído na referida área sombra tem uma atenuação significativa dos níveis de ruído.

Os obstáculos mais comuns que atenuam o ruído são as barreiras acústicas (Figura 8). No entanto, há outros elementos que reduzem os níveis de ruído, nomeadamente os elementos edificados (edifícios, garagens, outros elementos de atenuação), os naturais (taludes, vegetação entre outros) ou os mistos (combinação dos dois anteriores).

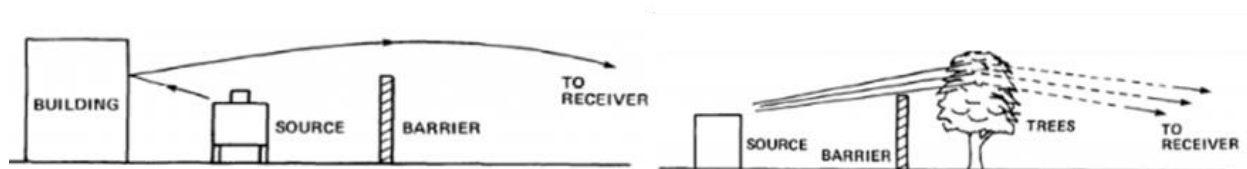


Figura 8: Ilustração tipo de barreiras acústicas (Fonte: (Hannah, 2006))

Os elementos de atenuação de ruído deverão ser colocados entre as fontes de ruído e áreas sensíveis ao ruído e podem incluir muitas tipologias (edificada ou natural) e diferenciações (formato, dimensões, materiais, etc.)

A adaptação de zonas de proteção (sombreamento acústico) ao longo das principais infraestruturas viárias é uma forma de garantir a separação espacial entre as fontes sonoras e as áreas sensíveis ao ruído, como uma estratégia de redução do impacto do ruído no tipo de zonamento (sensível ou mista) (Silva, 2007a).

Outra forma de promover a redução do ruído é na fase de conceção do edifício ou da área residencial considerar a localização das possíveis fontes de ruído e adequar, a partir daí, uma solução consciente, como criar uma zona "buffer" (um edifício não sensível protegendo um sensível) ou conceber os layouts do exterior e interior do edifício consoante a maior ou menor exposição ao ruído ou na criação de mais ou menos área protegida (Figura 9).

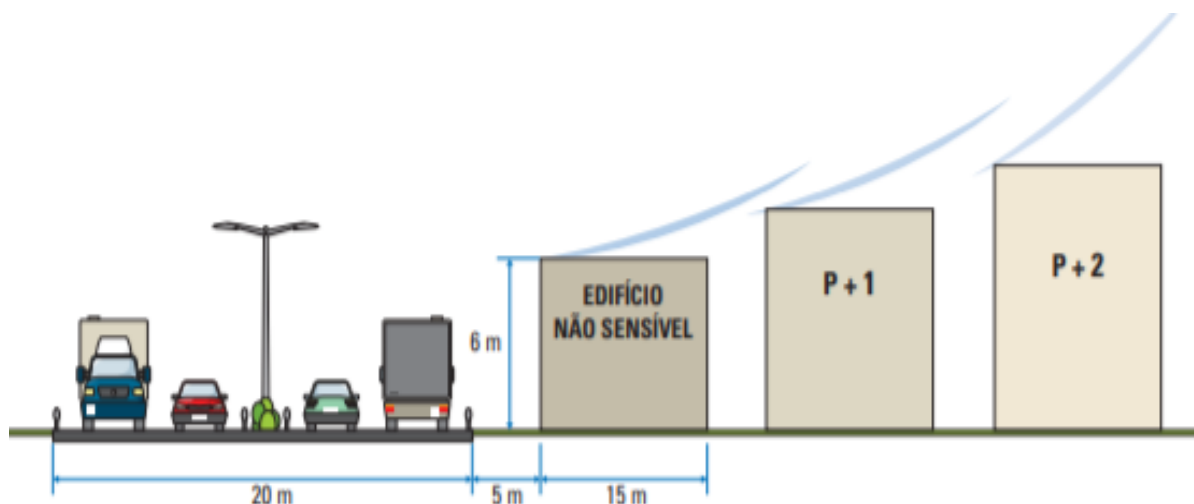


Figura 9: Ilustração de uma zona “buffer” (Fonte: (Ministère de Territoire, 1978))

As barreiras acústicas que funcionem como proteção às áreas residências devem garantir que na sua descontinuidade (mais do que 10m sem barreira acústica), e segundo a Agência Portuguesa do Ambiente (2004) devam ser compensadas por outras formas de proteção ao ruído.

As áreas de proteção ao ruído, dependem não só do edificado, mas sobretudo da potência da fonte condicionada pelas características da via (número e largura de faixas, número e tipo de veículos, velocidades de circulação, etc.) e da sua interação é que se poderá almejar uma redução de ruído.

O modo como o edifício se relaciona com a via (fonte de ruído) determina a variabilidade dos níveis de ruído a que o edifício está exposto. Nomeadamente, a implantação, a volumetria e a forma do edifício são, entre outros elementos, os que mais determinam a criação de zonas de sombreamento.

Se determinada forma urbana apresentar uma implantação paralela à via, os níveis de ruído serão mais elevados na fachada confinante com a via. No entanto, poderá favorecer a criação de áreas com menor ruído (sombreamento acústico) na fachada posterior como é possível ver no exemplo da Figura 10.

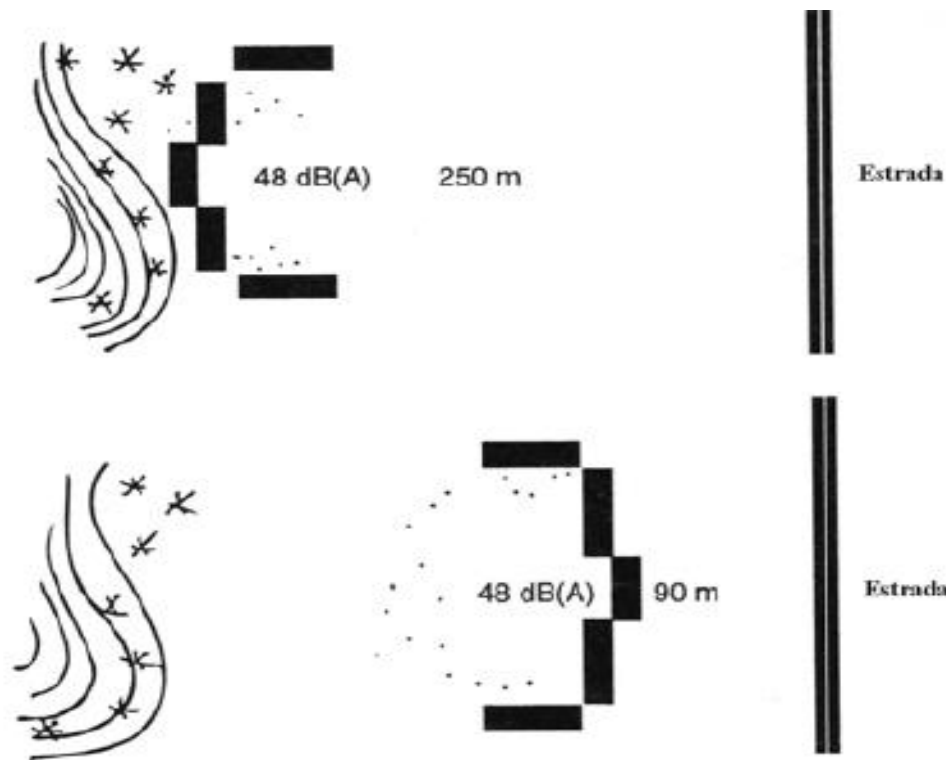


Figura 10: Localização do edifício privilegiando a criação de zonas sombra (Fonte: (L. T. Silva, 2007))

O volume edificado pode constituir uma barreira física eficaz, como ilustrado na figura anterior, ao garantir uma área de menor exposição ao ruído, ao conter na sua área de influência, a denominada área sombra. Ao contrário da primeira forma que obteve o mesmo nível de ruído a uma distância muito superior em relação à via.

O sombreamento acústico é fruto da implementação de uma barreira acústica na propagação do ruído. Existem vários métodos (Kurze & Anderson, 1971; Maekawa, 1968; Priyadarshinee *et al.*, 2018; Rathe, 1969) para medir a performance acústica das barreiras, através de gráficos, tabelas, ou programas computacionais.

O método de cálculo utilizado pelo Department of Transport and Welsh Office (1988) continua atual no cálculo de atenuação do ruído proveniente do tráfego rodoviário por uma barreira acústica, ilustrado na Figura 11.

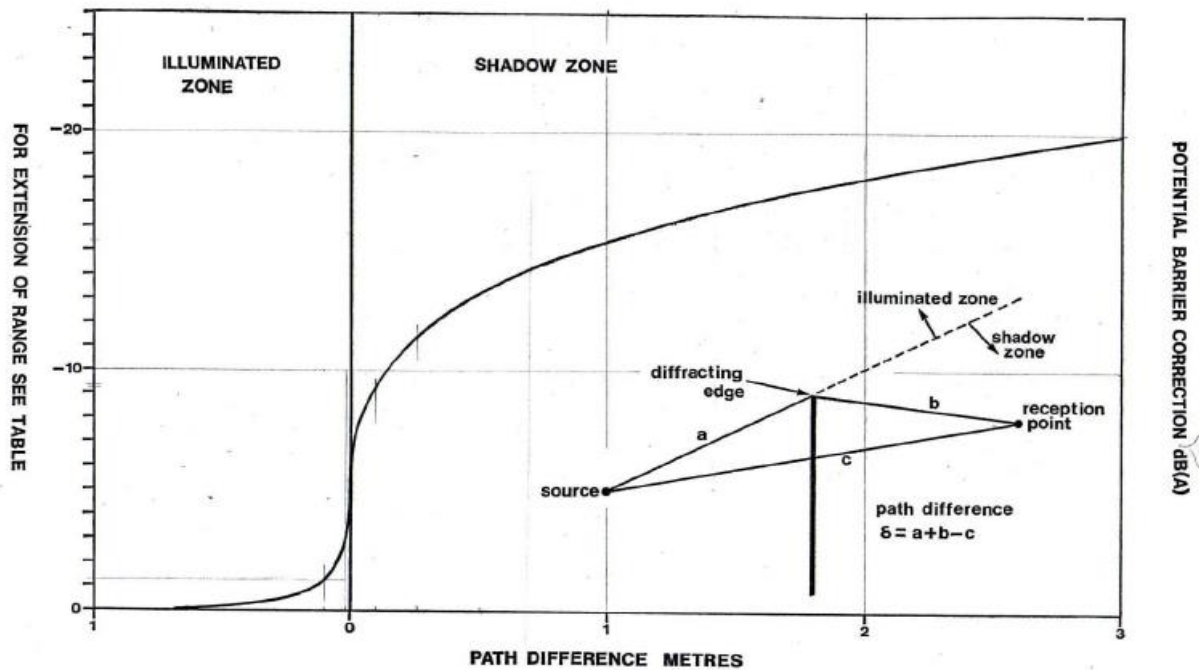


Figura 11: Correção de barreira em função da distância (Fonte: (Department of Transport and Welsh Office, 1988))

O gráfico apresenta um limite teórico de atenuação pela barreira de aproximadamente 20 dB (A) na zona de sombra e a diferença de atenuação pode ser da ordem de 3 dB por oitava para $\delta = 0,5$ m.

Por outro lado, na zona iluminada a atenuação da barreira acústica tende para zero quando $\delta = -0.6$ (caso em que o emissor não está bloqueado em relação ao recetor), o que significa que nesta região a barreira acústica é pouco eficiente. A Figura 12. apresenta a diversidade de comportamento entre zona iluminada e zona de sombra.

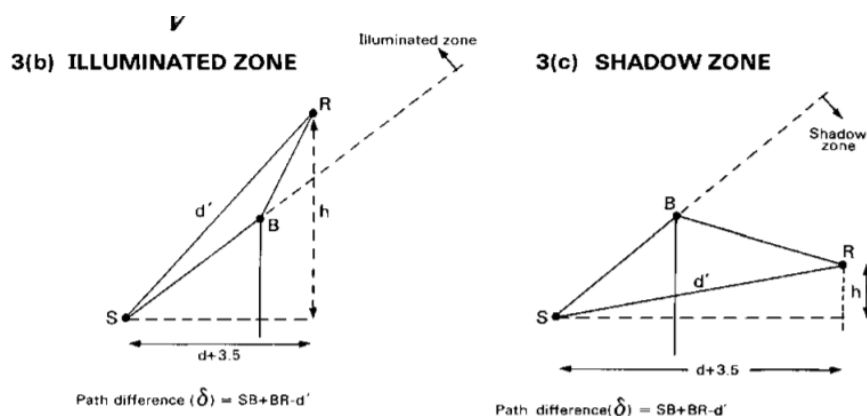


Figura 12: Ilustração da atenuação da barreira acústica para a zona iluminada e para zona de sombra (Fonte: (Department of Transport and Welsh Office, 1988))

A maioria dos métodos de cálculo para barreiras acústicas adotam um valor típico de N (número de Fresnel), que calcula a performance acústica de uma barreira vertical, e que corresponde as frequências entre 300 e 500 Hz, permitindo assim uma ponderação em dB(A) (Rodrigues, 2013).

O desempenho acústico de uma barreira depende de diferentes parâmetros, mas os principais relacionam-se com a frequência, a distância entre os elementos (fonte, barreira, recetor), a altura relativa do emissor e do recetor e/ou da própria barreira (dimensões e materiais).

A relação da frequência (alta ou baixa) com a difração pode condicionar a eficácia das barreiras, nomeadamente ao atenuar o ruído de baixa frequência em distâncias grandes entre o emissor e o recetor, o sombreamento acústico também é reduzido, como é visível na ilustração seguinte (Figura 13) (Metropolitan Acoustics, 2017).

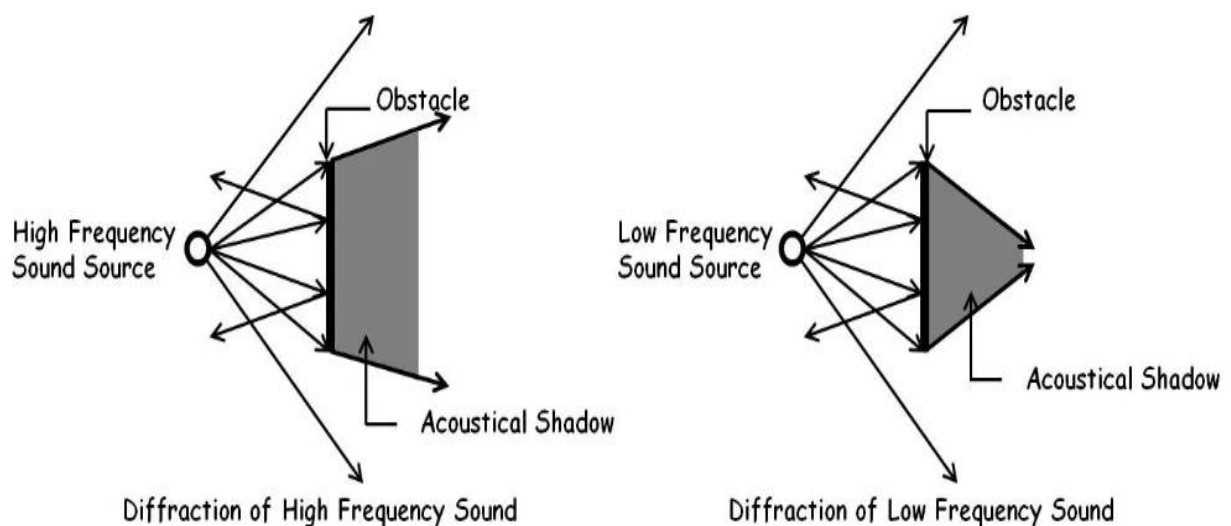


Figura 13: Ilustração do efeito da difração dependendo da frequência (Fonte: (Metropolitan Acoustics, 2017))

O sombreamento acústico é um parâmetro a ter em consideração nas estratégias de redução do ruído. Na impossibilidade de eliminar a fonte de ruído, as zonas sombra são uma estratégia a explorar.

2.2.1.1. Casos de Estudo de Sombreamento Acústico

Foram pesquisados de uma forma sistemática artigos científicos, escritos em inglês, relacionados com estudos da envolvente de edifícios num ambiente construído com referência a sombreamento acústico. A pesquisa inicial começou a abril de 2019 e foi realizada utilizando as seguintes bases de dados bibliográficas: ScienceDirect, Scopus, Institute for Scientific Information Web of Science e American Institute of Physics. A pesquisa principal baseou-se nos termos relacionados com som/ruído e componentes da envolvente dos edifícios, utilizando os seguintes termos de pesquisa booleana nos domínios da engenharia e da ciência ambiental: (('sound' OR 'noise') AND ('building envelope' OR 'façade')) e numa segunda fase 'Acoustic Shadow' OR 'Acoustic Shading' AND 'Case study'. Para abranger todos os domínios da acústica, não foram incluídas nos termos de pesquisa palavras-chave metodológicas como redução do ruído. A janela temporal da pesquisa baseou-se nas datas predefinidas em cada base de dados, tendo a última pesquisa sido efetuada em maio de 2024.

Os resultados da pesquisa foram exportados para o Mendeley (Software de gestão de referências), que identificou 245 artigos científicos publicados. Foram considerados critérios de exclusão a ausência de palavras-chave no resumo, se no resumo não mencionasse o termo “ruído” ou “estudo de caso” esses artigos eram eliminados. Foram nesta fase eliminados os artigos duplicados ($n = 15$). Se no resumo não apresentasse qualquer metodologia com medições e simulações de ruído de tráfego automóvel os artigos eram novamente eliminados ($n = 122$). Posteriormente, os restantes 108 artigos de texto completo foram avaliados quanto à elegibilidade, dos quais foram excluídos de uma avaliação mais aprofundada, como a ausência de informações sobre medidas de redução física do ruído ou referência a sombreamento acústico.

A seleção final resultou em 25 artigos de revistas científicas relevantes que foram lidos e analisados um a um quanto ao método e conteúdo, dos quais o artigo mais antigo foi publicado em 2011 (Guedes *et al.*, 2011). Entre os 25 artigos, os estudos selecionados têm as fachadas como objeto de estudo, retirando os estudos que em exclusivo falam das varandas das fachadas e não as fachadas num todo. Os casos de estudo apresentados na Tabela 1 e 2, são estudos que têm por base medições e simulações de ruído em edifícios multifamiliares e que apresentam referência ao sombreamento acústico diretamente ou indiretamente.

Tabela 1: Casos de Estudo de Sombreamento Acústico

Contexto	Caso de Estudo	Objetivo -Tópicos
Global	(Guedes <i>et al.</i> , 2011)	O estudo, que envolveu medições in situ e simulações acústicas com recurso ao software SoundPLAN, iniciou-se com uma análise do cenário acústico atual, seguindo-se a criação e simulação de cenários hipotéticos em sectores ainda não ocupados da região em estudo. Os resultados revelam que as características físicas da forma urbana, como a densidade de construção, a existência de espaços livres e a forma e posição física dos edifícios, exercem uma influência significativa no ruído ambiente.
	(Zhao <i>et al.</i> , 2017)	O método permite o mapeamento de ruído 3D com modelos realistas de edifícios e estradas (em vez de utilizar os dados de tráfego, aplicam os níveis de ruído de emissão rodoviária estabelecidos por medições no terreno) São apresentados exemplos de verificação e validação envolvendo edifícios altos, bem como vários exemplos de mapas de ruído 3D.
Europeu	(Benocci <i>et al.</i> , 2020)	Estuda a propagação do ruído a diferentes alturas no contexto de uma rede rodoviária de média dimensão, como a de Milão, Itália. Tendo em conta a tendência de desenvolvimento da “habitação vertical” para os edifícios nas grandes cidades, a avaliação da exposição da população ao ruído a diferentes alturas torna-se crucial, uma vez que os residentes podem estar sujeitos a incómodos sonoros apesar da sua distância da fonte.
	(Janczur <i>et al.</i> , 2011)	Estudo onde a precisão da modelação é definida na gama de validação do modelo de simulação. A comparação com as medições no terreno mostrou que o modelo de simulação pode ser aplicado aos pisos superiores do edifício de grande altura. Para esta gama, os resultados obtidos podem ser aplicados na conceção dos meios de redução do ruído.

Tabela 2: Casos de Estudo de Sombreamento Acústico (continuação)

Contexto	Caso de Estudo	Objetivo -Tópicos
Europeu	(Echevarria Sanchez <i>et al.</i> , 2016)	Estudo do efeito do desenho dos canhões das ruas na distribuição do nível de pressão sonora ao longo das fachadas e dos passeios foi considerado em 42 casos. Os resultados numéricos demonstram que a forma dos edifícios, a geometria das ruas e a presença de mobiliário urbano podem ter um forte impacto na exposição das pessoas ao ruído. A conceção das fachadas dos edifícios e a geometria das ruas podem melhorar o ambiente sonoro para as pessoas que vivem e caminham ao longo de ruas urbanas movimentadas e devem ser consideradas na futura conceção de ruas urbanas.
Europeu (Português)	(Silva <i>et al.</i> , 2014a)	Estudo com diferentes cenários com o objetivo de estudar os efeitos do ruído nas fachadas e como estes efeitos podem então ser minimizados antecipadamente, ajustando o traçado da tipologia urbana. Este procedimento comparou os valores obtidos através da modelação com os valores medidos em locais selecionados.

Os casos de estudo sobre sombreamento acústico apresentados na Tabela 1 e 2, selecionados a partir da pesquisa sistemática das bases de dados referenciadas anteriormente, promovem uma análise global do que é estudado e quais os métodos utilizados na análise do sombreamento acústico. Foi possível detetar que a geometria e a altura do edificado influenciam os níveis de ruído e complexidade de forma das fachadas influencia o sombreamento acústico das mesmas.

2.2.1.2. Software de Cálculo de Sombreamento Acústico

Os softwares de cálculo são ferramentas poderosas para a modelação e avaliação do ruído, mas têm diferentes características e especialidades. A modelação do ruído ambiental, dependendo do software poderá ter uma integração SIG e características de conformidade regulamentar, ser versátil e com interface de fácil utilização, mas também não deter características avançadas.

Os softwares apresentados têm por base a criação de mapas de ruído (horizontais e verticais) / modelos de previsão de ruído, onde é possível introduzir diferentes fontes de ruído (nomeadamente, o tráfego

automóvel senão seria fator de exclusão na escolha do software), a importação de dados de outros softwares, como GIS ou CAD, tem pertinência na seleção e o acesso ao software (open source ou não) e, por último, a possibilidade de calcular diretamente o sombreamento acústico. Nenhum dos softwares apresentados nas Tabela 3, 4 e 5 permitem o cálculo diretamente, no entanto, a maioria permite calcular áreas com menos exposição ao ruído.

Tabela 3: Softwares de cálculo de sombreamento acústico

Método /Software	Cálculo	Vantagens	Desvantagens
Software comercial com uma taxa de licenciamento			
CadnaA	- diferentes fontes de ruído (estradas, caminhos-de-ferro, instalações industriais e ruído comunitário) - modelação do ruído incluindo: - visualização 3D - modelação da propagação - integração GSIG - cenários de ruído complexos - analisar o impacto de diferentes fatores nos níveis de ruído.	- interface de fácil utilização e fluxo de trabalho intuitivo, visualização de resultados - algoritmos avançados para modelação da propagação do som, tendo em conta vários fatores ambientais, como o terreno, as condições meteorológicas e a interferência de obstáculos.	- não calculam diretamente a sombra acústica. - software comercial com uma taxa de licenciamento.
SoundPLAN	- as diferentes fontes de ruído (instalações industriais, tráfego rodoviário e ferroviário) - avaliar o seu impacto no ambiente circundante. - cartografia e simulação do ruído. - integração SIG - funcionalidades de conformidade regulamentar (incorporação de dados espaciais como o terreno, a utilização do solo e a disposição dos edifícios nos seus modelos de ruído)	- orientações definidas por autoridades como a Diretiva da União Europeia relativa ao ruído ambiente (END) e a Administração Federal das Autoestradas dos EUA (FHWA). - ajuda os utilizadores a identificar áreas onde os níveis de ruído excedem os limites aceitáveis e a desenvolver estratégias de atenuação.	- não calculam diretamente a sombra acústica. - software comercial com uma taxa de licenciamento.

Tabela 4: Softwares de cálculo de sombreamento acústico (continuação)

Método /Software	Cálculo	Vantagens	Desvantagens
Software comercial com uma taxa de licenciamento			
CadnaR	• mantém muitas das principais funcionalidades do CadnaA, mas introduz melhorias em termos de interface do utilizador, desempenho e capacidades de modelação	• oferecer uma melhor compatibilidade com sistemas operativos. Detém ferramentas de visualização e capacidades de elaboração de relatórios melhoradas • fornecer fluxos de trabalho mais eficientes e uma melhor integração com outras ferramentas de software utilizadas na avaliação do ruído e na modelação ambiental	• não calculam diretamente a sombra acústica • software comercial com uma taxa de licenciamento. • mais caro que o CadnaA
SONarchitect	• software de modelação e previsão de ruído • várias fontes de ruído (ruído do tráfego rodoviário, ruído do tráfego ferroviário, ruído industrial e fontes de ruído da comunidade) • algoritmos avançados de modelação da propagação do som, considerando fatores como o terreno, as condições meteorológicas e as estruturas dos edifícios	• ter módulos especializados ou características adaptadas a aplicações específicas, como a acústica de edifícios ou a avaliação do ruído de turbinas eólicas • facilidade de utilização e compatibilidade com fluxos de trabalho existentes e semelhantes aos do CadnaA	• não calculam diretamente a sombra acústica • software comercial com uma taxa de licenciamento
NOISEMAP	• várias fontes, incluindo tráfego rodoviário, aeronaves e caminhos-de-ferro • fornece ferramentas para o mapeamento de contornos de ruído, análise de impacto e planeamento de mitigação de acordo com os requisitos regulamentares	• desenvolvido pela Federal Highway Administration (FHWA), principalmente para a avaliação dos impactos sonoros relacionados com os transportes, em particular nas estradas e nos aeroportos	• não calculam diretamente a sombra acústica • software comercial com uma taxa de licenciamento • requisitos específicos do projeto e dos regulamentos da avaliação do ruído

Tabela 5: Softwares de cálculo de sombreamento acústico (continuação)

Método /Software	Cálculo	Vantagens	Desvantagens
Opções de fonte aberta			
SoundScape Renderer (SSR)	• permite aos utilizadores simular cenas sonoras complexas, incluindo sons ambientais, ruído urbano e outros fenómenos acústicos	• permite aos utilizadores simular cenas sonoras complexas, incluindo sons ambientais, ruído urbano e outros fenómenos acústicos	• não calcula diretamente a sombra acústica. • o seu objetivo é a síntese e a reprodução de paisagens sonoras virtuais, com vista a recriar ambientes sonoros realistas. • software comercial com uma taxa de licenciamento

O uso do software permite contextualizar e exemplificar de forma a extrapolar resultados e análises para casos similares e harmonizar metodologias ou compatibilizar formatos. A informação e/ou partilhar a base de dados comum são os requisitos da Diretiva INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in the European Community*, ou a Diretiva 2007/2/CE), que é uma legislação da União Europeia que visa estabelecer uma infraestrutura de dados espaciais na Europa para facilitar o intercâmbio, partilha, acesso e uso de dados espaciais entre os países membros da UE.

A diretiva estabelece requisitos técnicos e organizacionais para criar uma infraestrutura coesa e interoperável, que define as condições globais para a criação de uma Infraestrutura Europeia de Informação Geográfica. Esta plataforma possibilita o acesso e a partilha de informação útil em termos de Ambiente e outras temáticas pelas instituições públicas dos Estados-Membros, previsto nas diretrizes do CNOSSOS-EU (Métodos Comuns de Avaliação do Ruído da Europa).

A Diretiva (UE) 2015/996 da Comissão, de 19 de maio de 2015, atualizada pela Diretiva Delegada (UE) 2021/1226 da Comissão, de 21 de dezembro 2020, publicou os métodos comuns de cálculo de ruído por tipo de fonte sonora – rodoviária, ferroviária, aérea e industrial designados pelo CNOSSOS-EU e que passaram a ser de carácter obrigatório desde 2020, para todos os Estados-Membros da União Europeia.

2.2.1.2.1. CNOSSOS e as respectivas equações fundamentais

A quantidade e o tipo de veículos que circulam, bem como o estilo de condução, afetam a potência acústica que o fluxo de tráfego emite. Em termos da gama de frequências que cobrem e da quantidade de energia sonora que libertam, os veículos ligeiros e pesados contribuem para o ruído ambiente de formas diferentes. O perfil aerodinâmico do veículo, o ruído produzido pela carroçaria e o ruído produzido pela relação pneu/pavimento são os principais fatores determinantes da energia e do conteúdo espectral do ruído emitido pelo veículo (Silva, 2007a).

Estabelece-se um modelo de veículo rodoviário por meio das equações matemáticas representativas das duas principais fontes de ruído:

1. Ruído de rolamento devido à interação entre o pneu e o pavimento;
2. Ruído de propulsão gerado pelo grupo motopropulsor (motor, escape etc.) do veículo.

O ruído aerodinâmico é incorporado na fonte de ruído de rolamento.

No caso dos veículos a motor ligeiros, médios e pesados (categorias 1, 2 e 3), a potência sonora total corresponde à soma energética do ruído de rolamento e do ruído de propulsão (Portaria n.º 42/2023, de 9 de fevereiro, 2023).

O modelo CNOSSOS considera que todos os veículos da categoria **m** que integram o fluxo de tráfego circulam à mesma velocidade (v_m), a velocidade média do fluxo de veículos da categoria em causa. O nível total de potência sonora das fontes em linha $m = 1, 2$ ou 3 define-se, portanto, do seguinte modo:

$$L_{w,i,m}(v_m) = 10 \times \lg (10^{L_{wR,i,m}(v_m)/10} + 10^{L_{wP,i,m}(v_m)/10}) \quad (2)$$

Em que:

$L_{wR,i,m}$ - é o nível de potência sonora correspondente ao ruído de rolamento;

$L_{wP,i,m}$ - é o nível de potência sonora correspondente ao ruído de propulsão.

(v_m) - a velocidade média do fluxo de veículos da categoria em causa.

Esta equação é válida para todas as gamas de velocidade. No caso de velocidades inferiores a 20 km/h, o nível de potência sonora a considerar é o resultante da aplicação da fórmula para $v_m = 20$ km/h. No caso dos veículos de duas rodas (categoria 4), apenas se considera para a fonte o ruído de propulsão:

$$L_{W,i,m} = 4 (v_m = 4) = L_{WP,i,m} = 4 (v_m = 4) \quad (3)$$

2.2.1.3. Equipamentos de medição de ruído

Há 4 tipos principais de instrumentos disponíveis para medir níveis de ruído, dependendo das múltiplas variações necessárias para a medição. Assim, surgem:

1) Sonómetros não-integradores

Podem ser utilizados sonómetros não integradores quando se trate de medição do nível sonoro (LPA) ponderado A de um ruído uniforme. Quando a pressão sonora apresenta flutuações de nível sonoro LpA de grande amplitude ou durações irregulares deve evitar-se a utilização de sonómetros não integradores nestes casos (ANEXO II - Instrumentos de medição do ruído e condições em que poderão ser utilizados).

2) Sonómetros integradores

Estes sonómetros têm a capacidade de poder calcular o nível sonoro contínuo equivalente, Leq. Incorporam funções para a transmissão de dados ao computador, cálculo de percentis, análise em frequência, entre outras funções.

Fazem parte do sonómetro vários módulos cujas funções são diversas. O microfone converte a variação da pressão que lhe chega num sinal elétrico. Este sinal é depois amplificado no pré-amplificador, é filtrado pelos filtros de ponderação (filtros A, B ou outros) e segue para o detetor. Este último e importante módulo permite ao sonómetro efetuar a leitura do som mediante o modo de leitura escolhido. O tipo de leitura pode ser feito em intervalos de tempo diferentes, isto é, tempos de resposta: Slow, Fast e Impulse. O tipo de leitura é condicionado pelo tipo de ruído que se pretende medir. O Regulamento Geral de Ruído (RGR) recomenda o modo “fast” e o filtro de ponderação A para caracterizar o ruído ambiente, nomeadamente o ruído proveniente do tráfego rodoviário

Os sonómetros integradores, tal como o nome indica, possuem um circuito integrador que permite determinar o ruído equivalente, ou seja, o valor da energia sonora acumulada durante todo o período de medição, possibilitando assim o cálculo do Leq(A) para o período de medição bem como do Lmax e Lmin registados no mesmo período. Por fim, o nível de ruído e/ou os indicadores de ruído são gravados, e/ou registados, ou, no caso dos equipamentos mais simples, enviados para o display do sonómetro (normalmente digital).

2.3. Radiação solar

A radiação solar tem como fonte de calor, o sol, de acordo com Gonçalves e Graça, (2004) há a necessidade de estudar a sua interação com a envolvente (o edificado), a sua posição e em que altura do ano e se mede sua radiação, de forma a projetar melhor o edificado.

Coutinho (2018) considera a energia solar que atinge a superfície terrestre como o exemplo mais incisivo de transmissão de calor por radiação. Os ganhos solares daí provenientes podem ser diretos ou indiretos.

Cheng *et al.* (2006) estudaram o potencial solar de dezoito modelos genéricos, segundo três critérios de desenho, nomeadamente as aberturas ao nível do solo (*Sky View Factor*), o fator luz-dia na fachada (*Daylight Factor*) e o potencial fotovoltaico na envolvente do edifício com o intuito de avaliaram as relações entre as formas contruídas, a densidade e o potencial solar.

A intensidade da energia radiante que um corpo emite é dada pela Lei de *Stefan-Boltzmann* e relaciona a emissividade da superfície, a temperatura absoluta da superfície do corpo com a Constante de *Stefan-Boltzmann* ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^4$) obtendo a energia radiante emitida por unidade de área.

A intensidade do fluxo de calor envolvido na troca de calor por radiação entre as superfícies de dois corpos relaciona de uma forma simplificada, as temperaturas absolutas das superfícies dos corpos com o coeficiente de trocas térmicas por radiação, que é um parâmetro que considera todos os fatores que interferem nas trocas por radiação, nomeadamente os aspetos geométricos e físicos das superfícies envolvidas, bem como a emissividade e a absorção térmicas das superfícies (Coutinho, sem data).

A radiação solar incide sobre determinado corpo de diferentes formas (incidência, absorção, reflexão e transmissão) e assume um papel importante no estudo da envolvente exterior face à exposição solar.

Em particular, a radiação absorvida, vai alterar a temperatura da superfície da envolvente exterior, quer seja opaca ou transparente, originando a par da radiação transmitida ganhos térmicos nos edifícios, o esquema seguinte ilustra esses mecanismos de trocas de calor devido ao efeito da radiação numa parede exterior opaca ou transparente (Figura 14).

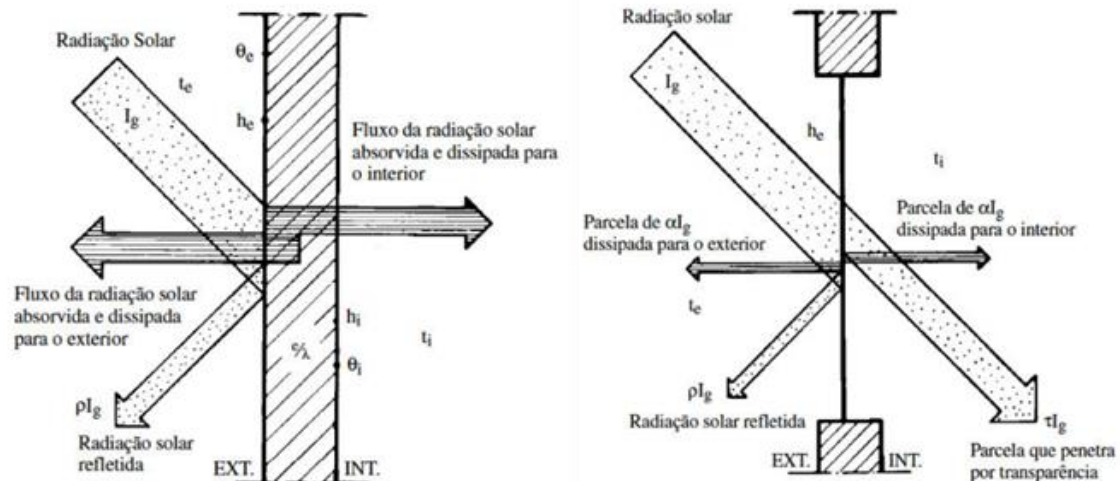


Figura 14: Efeito da radiação solar numa parede opaca exterior e num pano transparente exterior (Fonte: (Frota & Schiffer, 2001))

As trocas de calor pela envolvente dos edificios dão-se usualmente pelo efeito combinado da condução, da convecção e da radiação. Ocorre essencialmente através dos elementos opacos ou transparentes, sejam eles verticais, como os que integram as fachadas, ou horizontais, como os das coberturas (Figura 15).

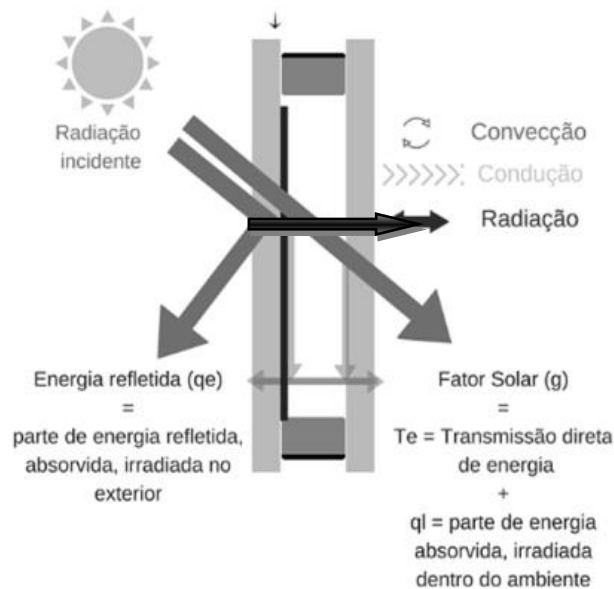


Figura 15: Trocas térmicas secas em edificios (convecção, condução e radiação) e o efeito da radiação incidente (Adaptado de: (Coutinho, 2018))

A definição mais genérica de radiação solar é: “Energia irradiada pelo Sol sob a forma de ondas eletromagnéticas, incluindo a luz visível e ultravioleta e a radiação infravermelha” (Glossario | Goldenergy, 2024). Em suma, isto significa que toda a radiação eletromagnética que é emitida pelo sol é referida como radiação solar. No entanto, existe outra palavra para radiação solar que tem um significado semelhante: irradiância solar. A irradiância solar, definida como “A quantidade de energia eletromagnética incidente numa superfície por unidade de tempo e por unidade de área” (Stickler & Lee, 2011). Esta definição refere-se à energia eletromagnética, que é a radiação solar, que incide sobre uma superfície durante um determinado período de tempo. Nesta diferença subtil, consiste principalmente no facto de a irradiância solar incluir a radiação solar, mas não o contrário. Outra definição de irradiância solar é: “A quantidade de radiação solar que incide sobre uma superfície por tempo”. No entanto, esta diferença é extremamente importante para não confundir os dois termos (Burgt, 2020).

Em Portugal, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) permite simular a radiação solar incidente em edifícios na envolvente dos edifícios, em função da sua localização, através de tabelas de referência.

As tabelas permitem determinar os valores da radiação solar a que a envolvente do edifício está exposta, de acordo com a sua orientação e para as duas estações do ano, o Inverno (aquecimento) e o Verão (arrefecimento).

A radiação solar incidente engloba três tipos de radiação, a direta, a difusa e a refletida. A radiação direta depende do sombreamento dos outros edifícios e do ângulo de incidência entre o sol e a face do edifício em estudo. A radiação difusa depende apenas da porção de céu visível da superfície terrestre e a refletida que resulta da reflexão da radiação solar na superfície, dependendo das propriedades óticas da superfície e é traduzida na equação seguinte:

$$\begin{aligned} & \textit{Radiação Solar Incidente} & (4) \\ & = (I_b \times F_{\text{sombreamento}} \times \cos(\theta)) + (I_d \times F_{\text{céu}}) + I_r \end{aligned}$$

Em que:

I_b : Radiação de feixe direto, medida perpendicular ao sol [kW.h];

I_d : Radiação difusa do céu, medida no plano horizontal [kW.h];

I_r : Radiação refletida do solo [kW.h];

$F_{\text{sombreamento}}$: Fator de sombreamento;

$F_{\text{céu}}$: Fator de céu visível (percentagem com base na máscara de sombreamento);

θ : Ângulo de incidência entre o sol e a face a ser analisada. [$^{\circ}$]

No estudo da interação entre a forma urbana e o potencial solar, o sombreamento é um dos elementos com maior impacto e o fator de sombreamento mede as sombras produzidas pelos edifícios vizinhos ou restantes obstáculos que possam interferir na incidência solar.

2.3.1. Sombreamento solar

O sombreamento solar é a consequência de obstruções no horizonte, normalmente por edifícios vizinhos ou por elementos salientes do próprio edifício, como as varandas ou as palas (Ministério da Economia e do Emprego, 2013).

O fator de sombreamento é o parâmetro que melhor representa o sombreamento solar e é definido pelo rácio entre a radiação solar global recebida numa dada superfície na presença de obstáculos e na ausência dos mesmos (Cascone *et al.*, 2011).

2.3.2.1 Casos de estudo de sombreamento solar

Foram pesquisados sistematicamente artigos de investigação em inglês relacionados com estudos de envelopes de edifícios num ambiente construído com referência a sombreamento solar. A pesquisa inicial começou a junho de 2019 e foi realizada utilizando as seguintes bases de dados bibliográficas electrónicas: ScienceDirect, Scopus, Institute for Scientific Information Web of Science e American Institute of Physics.

A pesquisa principal baseou-se nos termos relacionados com radiação solar e sombreamento solar e componentes da envolvente dos edifícios, utilizando os seguintes termos de pesquisa booleana nos domínios da engenharia e da ciência ambiental: (('solar' OR 'solar radiation ') AND ('building envelope' OR 'façade')) e numa segunda fase 'Solar Shadow' OR 'Solar Shading' AND 'Case study'.

Para abranger todos os domínios da investigação térmica, não foram incluídas nos termos de pesquisa palavras-chave metodológicas como térmica. As "datas de início" da pesquisa basearam-se nas datas predefinidas em cada base de dados, tendo a última pesquisa sido efetuada maio de 2024.

Os resultados da pesquisa foram exportados para o Mendeley, que identificou 536 artigos de investigação publicados. Se o resumo não mencionasse a radiação solar ou estudo de caso esses artigos eram eliminados, tendo também sido removidos os duplicados ($n = 33$).

Se no resumo não se apresentasse qualquer metodologia com medições e simulações de radiação solar, os artigos eram novamente selecionados ($n = 376$). Posteriormente, os restantes 127 artigos de texto completo foram avaliados quanto à elegibilidade, dos quais foram excluídos de uma avaliação mais aprofundada, como a ausência de informações sobre sombreamento solar.

A exclusão final resultou em 26 artigos de revistas relevantes que foram lidos e analisados quanto ao método e conteúdo, dos quais o artigo mais antigo foi publicado em 1984 (Ryerson, 1984). Entre os 25 artigos de revistas, foram selecionados os estudos que têm as fachadas como objetivo de estudo, retirando os estudos que em exclusivo falam das varandas das fachadas e não as fachadas num todo.

Os casos de estudo apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8, são estudos que tem por base medições e simulações de radiação solar em edifícios multifamiliares e que apresentam diretamente ou indiretamente referência ao sombreamento.

Tabela 6: Caso de estudo sobre sombreamento solar

Contexto	Caso de Estudo	Objetivo -Tópico
Global	Ryerson, 1984)	Compara se as sombras calculadas e as sombras medidas a partir de fotografias aéreas são fiáveis e exatas durante o procedimento de cartografia.
	Belakehal & Aoul, 1996)	Maximiza o sombreamento da fachada através da otimização dos seus componentes.
	I-Sallal (Al-Sallal, 1996)	Investiga as relações geométricas entre a forma do edifício e a localização e movimento do sol em alturas críticas do ano.
	Belakehal & Tabet, 2000)	Classifica as variantes ótimas da fachada que podem fornecer recomendações para uma otimização da estratégia de sombreamento de acordo com a orientação solar.
	Shukla <i>et al.</i> , 2015)	Estuda o acesso solar e o ensombramento de espaços abertos públicos e privados em áreas urbanas à medida que a densidade e a altura dos edifícios aumentam. Deteta períodos limitados do dia e pequenas diferenças entre a localização real e a nominal que podem resultar na recusa de um pedido de desenvolvimento proposto.
	Aksamija, 2015)	Controla os fatores físicos ambientais que devem ser considerados durante o processo de conceção.
	Sari & Laksana, 2020)	Durante a fase inicial de conceção, estuda o processo e a simulação energética, combinando softwares paramétricos (Climate Consultant, Rhino/Grasshopper, Honeybee, Ladybug e DIVA) que permitem uma maior precisão para permitir uma melhor análise energética (solar, sombra, ...).
	Garreau <i>et al.</i> , 2021)	Encontra um compromisso entre os dados disponíveis, as diferentes modelações, modelos de zonagem térmica e modelos de sombreamento solar que analisam os dados utilizando a mesma metodologia, avaliando a parcimónia da modelização.
	Dagher <i>et al.</i> , 2022)	Utiliza as sombras para minimizar a transmissão solar e os ganhos de calor em condições climáticas extremas. Um estudo para reduzir os ganhos solares que pode ser um método adequado para melhorar também o conforto térmico sem comprometer o fator de luz do dia.

Tabela 7: Caso de estudo sobre sombreamento solar (continuação)

Contexto	Caso de Estudo	Objetivo -Tópicos
Global	(Wen, Xie, <i>et al.</i> , 2022)	Compreender como os edifícios podem ser dispostos de modo a maximizar o efeito benéfico do sombreamento no verão e a minimizar o seu efeito adverso no inverno contribuiria para a eficiência energética dos edifícios urbanos em diferentes condições climáticas (estudos na China).
	(Wen, Yang, <i>et al.</i> , 2022)	Estuda a forma como as diferentes concepções dos edifícios circundantes afetam a energia de radiação solar transmitida pelas janelas (WTSRE) do edifício-alvo através da realização de um estudo paramétrico utilizando o EnergyPlus e propõe um método que pode avaliar rapidamente o efeito de sombreamento dos edifícios circundantes na fase de projeto com base nas bases de dados obtidas a partir do estudo paramétrico.
	(Wang, <i>et al.</i> , 2023)	Utilizando o critério de avaliação de vizinhança existente, os métodos de cálculo de sombra avaliam a sua eficácia em dois estudos de caso. Ambos os cálculos são exatos e eficazes e melhoram quando o critério proposto é integrado.
Europeu	(Salazarli Trujillo, 1998)	Avalia métodos de cálculo do desempenho de edifícios sob radiação solar direta e o benefício energético quando são aplicadas duas alternativas diferentes de proteção solar.
	(Carneiro, C., Morello, E., Desthieux, G., & Golay, 2010)	Estuda a qualidade do ambiente urbano (QAEU) através de diferentes técnicas e propõe uma definição correta dos indicadores (solar, sombra, ...) relacionados com o desenvolvimento urbano.
	(Grifoni, RC; Lapucci, D etrucci; Prenna, 2016)	Um estudo de caso que começa por estimar a radiação solar e depois avalia parâmetros úteis, como o fator de visão do céu e as sombras.
	(Kite, 2017)	Quadro cronológico que revela os principais locais e momentos em que as sombras moldam a arquitetura de formas diferentes e dinâmicas.
	(Vartholomaios, 2017)	Estuda estratégias de elevada compacidade urbana e concepção solar passiva e a sinergia que pode ser alcançada em diferentes densidades urbanas.

Tabela 8: Caso de estudo sobre sombreamento solar (continuação)

Contexto	Caso de Estudo	Objetivo -Tópicos
Europeu	(Alagoz, M;Beyhan, 2020)	Enumera as vantagens e desvantagens dos diferentes métodos destinados a alcançar uma solução ótima, tendo em conta o potencial de criação de sombras no edifício.
	(Kanters <i>et al.</i> , 2021)	Um estudo de planeadores urbanos que trabalham em municípios suecos que identifica uma linha de base, lacunas e necessidades de análise da energia solar-sombra.
Europeu (Português)	(A.Silva, 2009)	Estudo do comportamento térmico de um “caso” de edifício, sujeito a diferentes situações, incluindo diferentes orientações, diferentes tipos de sombreamento de janelas e outros componentes com impacto.
	(Silva & Henriques, 2012)	Estuda uma nova metodologia para o cálculo do fator de sombreamento, nomeadamente o fator de sombreamento para elementos horizontais.
	(Lopes, 2016)	Lista estudos comparativos das quatro metodologias de cálculo para uma melhor compreensão das diferenças metodológicas.
	(Ferreira, 2016)	Analisa as diferenças entre o atual regulamento das habitações (REH) e o anterior (RCCTE) para estudar quais as principais alterações na metodologia de cálculo e na classificação do desempenho energético.
	(Costa, 2016)	Avalia de que forma os parâmetros relacionados com a avaliação do desempenho energético que influenciam o seu próprio desempenho.
	(Carreira, 2017)	Explora os procedimentos para estimar o fator de sombra, comparando os métodos previstos no regulamento português e avaliando a sua exatidão.
	(Brito <i>et al.</i> , 2019)	Estuda as dificuldades de avaliação do potencial solar em zonas urbanas: os edifícios contíguos ou vizinhos não incluídos na área de estudo projetam sombras sobre os edifícios estudados; assim, para uma grande área de estudo, é necessário um mosaico de áreas com uma sobreposição significativa para evitar a sobreavaliação da irradiação incidente.

O objetivo de uma investigação baseada num estudo de caso centra-se na exploração de uma teoria que se pretende pôr em prática ou simular a realidade ou um contexto. A importância dos estudos de caso reside na apresentação de propostas, na deteção de problemas, necessidades e/ou oportunidades de correção ou aprendizagem de novos métodos para aplicar teorias em casos práticos. A validação da exploração passa pelo rigor e transposição exata da proposta teórica para um ambiente prático (UNDP, 2023b)

Em síntese, o denominador comum nos estudos apresentados nas Tabelas 6,7 e 8 é a procura pela otimização do sombreamento solar através de diferentes abordagens – desde métodos analíticos até modelações computacionais avançadas. Esta evolução reflete a crescente necessidade de integração entre desempenho ambiental, eficiência energética e qualidade dos espaços urbanos, destacando a relevância do sombreamento como premissa a ser considerada na arquitetura e no planeamento urbano sustentável.

2.3.2.2. Métodos de cálculo do sombreamento solar

Os métodos de avaliação que demonstram maior ou menor precisão no cálculo do fator de sombra nos edifícios, têm consequências económicas na utilização dos edifícios e os modelos preditivos são alternativas vantajosas na análise do desempenho energético (Wen, Yang, *et al.*, 2022).

A integração intencional de fatores de sombreamento para limitar os ganhos solares através de janelas de fachadas envidraçadas, tendo em conta as necessidades térmicas dos espaços, é uma das técnicas passivas mais cativantes. O cálculo do fator de sombreamento durante as estações de aquecimento e arrefecimento é utilizado e o mercado tem muitas opções que simulam, modelam e analisam as sombras solares.

As metodologias utilizadas para determinar a sombra num determinado objeto são muito variadas. A pesquisa bibliográfica realizada classificou as técnicas em quatro categorias para identificar aquelas que têm a capacidade de calcular o fator de sombreamento: Técnicas em ambiente CAD (Desenho Assistido por Computador), métodos que utilizam um Modelo Digital de Elevação (MDE), dispositivos de registo de obstruções no local e procedimentos permitidos pela lei portuguesa são alguns exemplos desses métodos, compilados na Tabela 9 e na Tabela 10.

Tabela 9: Listagem comparativa dos diferentes métodos de cálculo de sombras disponíveis no mercado (Adaptado:(Carreira, 2017)

Método/Software	Cálculo	Vantagens	Desvantagens
Cálculo - CAD (Computer Aided Design)			
SHADING (2023)	Coeficiente Geométrico de Sombra	Baixo custo Fácil de usar	Não calcula Fs, por padrão (quantifica sombra no objeto)
ShadowFX (2023)	Coeficiente Geométrico de Sombra	Baixo custo Fácil de usar	Não calcula Fs, por padrão (quantifica sombra no objeto)
TownScope (2023)	Mapas de radiação e duração da sombra	Calcula vários parâmetros em uma única simulação	Implementação de rotinas auxiliares para obter Fs
Sunhours (2023)	Fator de sombreamento (complementar)	Fácil construção (extensão do Sketchup)	Não calcula Fs, por definição (refere-se à perda de sombreamento)
Cálculo - MDE (Digital Elevation Models)			
GOSOL (2023)	Mapa de sombra Diagramas solares	Permite a importação de modelos CAD	Usa um MDT Necessita de rotina de cálculo para Fs Existência de áreas auto-sombreadas
SOL (2023)	Mapa de sombra Radiação global direta e difusa	Usa um MDS (Obstruções já representadas)	Falta rotina de cálculo de Fs Existência de áreas auto-sombreadas
Solar Analyst (2023)	Diagramas solares Mapa de sombra e radiação global direta e difusa	Usa um MDS Uma extensão do ArcGis	Necessita do algoritmo para cálculo de Fs Inexistência de áreas auto-sombreadas

Tabela 10: Listagem comparativa dos diferentes métodos de cálculo de sombras disponíveis no mercado (continuação) (Adaptado: (Carreira, 2017))

Método/Software	Cálculo	Vantagens	Desvantagens
Dispositivos de registo de obstruções no local			
SunEye 210 Shade Tool (2023)	Diagramas solares	Portabilidade Fácil de usar Adaptabilidade	Alto custo Falta algoritmo para cálculo de F_s
Solar Pathfinder (2023)	Diagrama de caminho solar	Pode ser usado a qualquer hora do dia ou do ano, com tempo nublado ou claro	Funciona com um princípio reflexivo, em vez de realmente mostrar sombras
HORlcatcher (2023)	Diagramas solares	Ferramenta fácil e rápida Acompanha uma câmara digital	Falta algoritmo para cálculo de F_s
As metodologias definidas na legislação portuguesa			
Calculation Methodologies (Order (extract) No. 15793-K/2013, 2013)	Fator de sombreamento	Cálculo de F_s , em função dos ângulos específicos de obstrução e orientação	Requer ferramenta auxiliar para calcular os ângulos de obstrução Processo demorado
Simplification rules (Order (extract) No. 15793-K/2013, 2013)	Fator de sombreamento	Aplicação fácil Rápida Sem necessidade de ferramentas auxiliares	Pode ser imprecisa ao incluir apenas 3 classes de sombreamento Análise local
Outros métodos combinados			
Envi-met (2023)	Projeção de sombras Análise de reflexão	Calcula vários parâmetros em uma única simulação	Alto custo
Ladybug (2023)	Mapa de sombra Diagrama de caminho solar Diagramas solares Radiação global direta e difusa	Gratuito Calcula vários parâmetros em uma única simulação Um plugin para Rhino e Revit Interação com CAD e BIM	Não é independente, necessita de outro software para calcular

Os pontos de auto-sombreamento, ou seja, as situações em que é a própria fachada que se encontra sombreada, devem ser tidos em conta na metodologia e/ou software e isso permite dissociar as noções de sombreamento indiferenciado e de sombreamento provocado por obstruções de acordo com a definição do fator de sombreamento (Carreira, 2017).

Investigar as premissas e os métodos de cálculo que estimam o fator de sombreamento solar foi objetivo do estudo e foi apresentado nas Tabela 9 e 10), apresentar metodologias e casos de estudos (Tabela 6, 7 e 8) pertinentes para o estudo proposto.

No entanto, calcular ou comparar os resultados obtidos com os dois métodos sugeridos pela legislação portuguesa, não é âmbito deste trabalho, pois como se poderá verificar nas equações de cálculo seguintes, é necessário, definir áreas de envidraçado e opacas e respetivos materiais que compõem as fachadas de forma a ser possível efetuar o cálculo. O âmbito do estudo não é esse cálculo, mas sim, num modo mais alargado ver a potência solar e exposição e respetivo sombreamento solar que chegam às fachadas independentemente do material que a compõem,

Os parâmetros de cálculo apresentados de seguida, são úteis e permitem corrigir os ganhos solares consoante as necessidades energéticas dos edifícios através da introdução de mecanismos de sombreamento que se adequam a cada estação.

2.3.1.1.1. As equações de cálculo do sombreamento solar

O fator de sombreamento é um parâmetro adimensional compreendido entre 0 e 1 e que depende da orientação, do clima, da latitude, da longitude e dos meses considerados em cada estação (aquecimento e arrefecimento).

De um modo geral, na estação de aquecimento, é conveniente potenciar os ganhos solares ($Q_{sol, aquec}$) pelos vãos envidraçados do edificado. Esses vãos vão permitir uma maior entrada de radiação solar no espaço e um previsível aumento da temperatura interior e um maior fator de sombreamento (F_s).

A relação de proporcionalidade direta entre o fator de sombreamento e os ganhos solares de determinado vão é calculada pela equação seguinte:

$$Q_{sol,aquec[kWh]} = G_{sul} + F_s + X_j + A_s + M \quad (5)$$

Em que:

G_{sul} : representa ao valor médio mensal de energia solar média incidente numa superfície vertical a Sul, durante a estação de aquecimento em kWh/m²,

F_s - fator de sombreamento,

X_j - fator de orientação para diferentes exposições,

A_s - área efetiva de radiação solar em m² ,

M - duração da estação de aquecimento em meses.

Na estação de arrefecimento é vantajoso obter-se um fator de sombreamento baixo, minimizando os ganhos solares pelos vãos envidraçados ($Q_{sol,arref}$) de modo a evitar situações de desconforto térmico proporcionando uma temperatura interior elevada, a expressão seguinte representa essa relação. Em que $G_{sol,arref}$ representa a energia solar média incidente, em kWh/m², no vão envidraçado durante toda a estação de arrefecimento.

$$Q_{sol,arref[kWh]} = G_{sol,arref} + F_{s,arref} + A_s \quad (6)$$

O fator de sombreamento, segundo a legislação portuguesa no âmbito da certificação energética de edifícios, pode ser calculado por duas abordagens distintas. A primeira abordagem calcula os ângulos de obstrução de todas as fontes de sombra existentes (Ministério da Economia e do Emprego, 2013). A segunda abordagem calcula o fator de sombreamento segundo um conjunto de regras de simplificação que atribuem uma classe de sombreamento baseada numa avaliação efetuada no local (Order (extract) No. 15793-E/2013, 2013).

A primeira abordagem de cálculo que a legislação portuguesa permite no cálculo do fator de sombreamento (F_s) (Equação 7) considera três componentes, nomeadamente F_h que é o fator de sombreamento do horizonte por obstruções exteriores ao edifício, F_o que representa o fator de sombreamento por elementos horizontais sobrejacentes ao envidraçado compreendendo palas e varandas. O F_f que corresponde ao fator de sombreamento por elementos verticais adjacentes ao envidraçado, compreendendo palas verticais, outros corpos ou partes de um edifício e que a equação seguinte retrata (Ministério da Economia e do Emprego, 2013).

$$F_s = F_h \times F_o \times F_f \quad (7)$$

O Fator de sombreamento do horizonte é definido como o efeito causado por obstruções distantes exteriores ao edifício, ou por edifícios vizinhos, que depende do ângulo do horizonte, nomeadamente, para a estação de aquecimento, é traçada uma reta que une o ponto central do envidraçado ao ponto mais alto da maior obstrução existente entre dois planos verticais (Figura 16.b)), fazendo um ângulo de 60° para cada um dos lados do envidraçado (Figura 16.b)), como se encontra ilustrado na Figura 15 (Ministério da Economia e do Emprego, 2013).

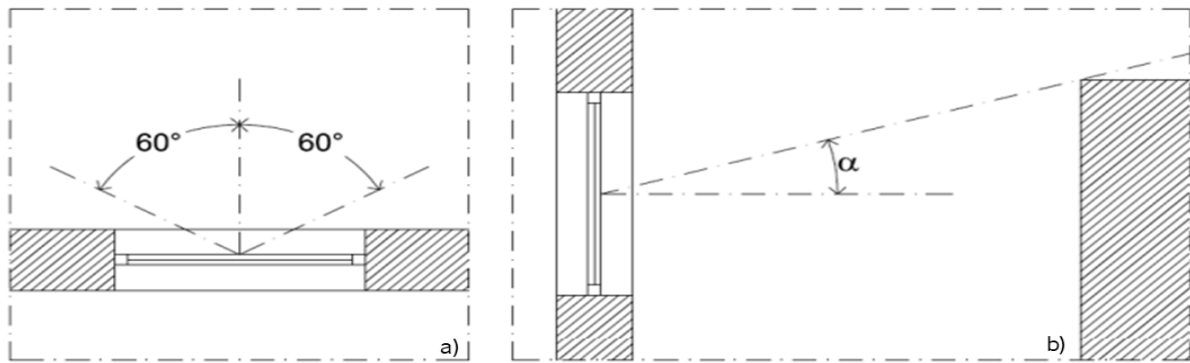


Figura 16: Plano de análise do ângulo de horizonte e sua representação (Adaptado de: (Ministério da Economia e do Emprego, 2013))

O ângulo que dado traçado faz com o plano horizontal denomina-se de ângulo de horizonte α e é dado pela equação:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{h_{obst} - h_{envidr}}{\Delta x}\right) \quad (8)$$

Em que:

h_{obst} - corresponde à elevação da obstrução;

h_{envidr} - representa a elevação do ponto central do envidraçado;

Δx - é a distância horizontal entre o vão envidraçado e o obstáculo (Ministério da Economia e do Emprego, 2013).

Os valores do fator de sombreamento do horizonte (F_h), na estação de aquecimento (Inverno) são obtidos associando a orientação do vão envidraçado ao respetivo ângulo do horizonte através do cálculo anterior, cujos valores estão representados na Tabela 11.

Tabela 11: Valores do fator de sombreamento do horizonte F_h na estação de aquecimento para Portugal Continental (Adaptado de: (Ministério da Economia e do Emprego, 2013))

	Situação de Inverno (estação de aquecimento)					
Ângulo do horizonte (θ)						
	Horizontal	N	NE/NW	E/W	SE/SW	S
0°	1	1	1	1	1	1
10°	0.99	1	0.96	0.94	0.96	0.97
20°	0.95	1	0.96	0.84	0.88	0.90
30°	0.82	1	0.85	0.71	0.68	0.67
40°	0.67	1	0.81	0.61	0.52	0.50
45°	0.62	1	0.80	0.58	0.48	0.45

A legislação nacional atual descarta a contribuição do horizonte para o cálculo do sombreamento na estação de arrefecimento, como tal prevê que esta tenha o valor de 1 para todas as orientações (Ministério da Economia e do Emprego, 2013).

O fator de sombreamento pretende quantificar a passagem do sol que é disponibilizado e não quantificar a sombra (ou falta dela) para determinado local. Segundo Ferreira *et al.* (2017) uma determinada fachada poderá ter um fator de sombreamento 1 mesmo estando sombreada num determinado período do dia e corresponder a um ponto sem sombreamento, este fenómeno designa-se de *self-shadowing point*, ou ponto auto-sombreado, em português, como referido anteriormente.

Nos estudos que se apresentam de seguida (estudo preliminar e caso de estudo) o objetivo é calcular a radiação solar que chega às fachadas, como já referido anteriormente, sem a necessidade de pormenorizar componentes da fachada, reduzindo o âmbito do estudo e alterando o propósito do mesmo.

2.3.2.3. Equipamentos de medição de radiação solar

A radiação solar pode ser avaliada por radiómetros utilizados como equipamento de medição. Dependendo do tipo de radiação medida, estes radiómetros têm nomes diferentes. Os radiómetros são equipamentos utilizados para a medição da radiação solar, sendo classificados de acordo com o tipo de radiação que medem. A radiação solar que chega a um determinado ponto da superfície terrestre pode

ser dividida em radiação direta e radiação difusa. A soma destas duas componentes resulta na radiação solar global, cuja medição é realizada por piranómetros, um tipo específico de radiómetro.

Um piranómetro é um dispositivo que mede a energia solar radiante total incidente na superfície analisada por unidade de tempo e por unidade de área. O dispositivo também permite medir a energia solar radiante total refletida a partir de uma superfície por unidade de tempo e unidade de área, e estes dados são suficientes para obter a reflectância solar, uma vez que é a razão entre a radiação refletida e a radiação incidente (Harrison *et al.*, 2015). Para além dos piranómetros, a radiação solar é também medida utilizando instrumentos como os pireliómetros ou os medidores solares (Karaman *et al.*, 2021).

Um pireliómetro deve ser montado com um dispositivo que aponte o instrumento para o Sol ao longo do dia e meça a "radiação solar direta", ou seja, a quantidade de energia solar por unidade de área e por unidade de tempo incidente num plano normal à posição do Sol no céu, referida como "irradiância normal direta" ou DNI (Hukseflux, 2023).

Existem diferentes tipos de pireliómetros e, de acordo com Duffie e Beckman (2013), o pireliómetro de disco de prata Abbot e o pireliómetro de compensação Angstrom são instrumentos padrão primários necessários. O pireliómetro de incidência normal de Eppley (NIP) é um instrumento padrão utilizado para medições práticas nos EUA e o actinómetro de Kipp & Zonen é amplamente utilizado na Europa. Ambos os instrumentos são calibrados de acordo com métodos padrão primários.

O medidor solar (ou solímetro) é um dispositivo que pode medir a energia solar ou a luz solar em unidades de W/m^2 , quer através de janelas para verificar a sua eficiência, quer durante a instalação de dispositivos de energia solar. Foi concebido para o controlo ambiental da intensidade da luz solar.

Os piranómetros são normalizados de acordo com a norma ISO 9060, que estabelece a classificação e especificação de instrumentos para a medição da radiação solar hemisférica e direta. Na versão de 1990, os piranómetros eram classificados em três categorias: "padrão secundário" (a mais elevada), "primeira classe" e "segunda classe". Contudo, a norma foi atualizada em 2018 (ISO 9060:2018), introduzindo novas designações para as classes de piranómetros: Classe A, Classe B e Classe C, correspondendo ao antigo "padrão secundário", "primeira classe" e "segunda classe", respetivamente. Estas classificações refletem a precisão e a qualidade dos instrumentos, sendo a Classe A, a de maior precisão. A atualização

da norma visa simplificar a categorização e alinhar-se com as práticas modernas de medição da radiação solar.

A norma também distingue dois tipos de piranômetros existentes: o piranômetro de termopilha (vulgarmente conhecido como piranômetro, é um sensor de termopar ligado em série que converte a energia térmica em energia elétrica, ou seja, mede a radiação solar incidente pelo calor que gera) e o piranômetro de silício (também conhecido como "Silicon-Pyranometer", tem um sensor fotoelétrico que mede a radiação solar incidente pela eletricidade que gera). Embora os piranômetros tenham um design semelhante, diferem nos seus sensores de medição, como se mostra na Figura 17.

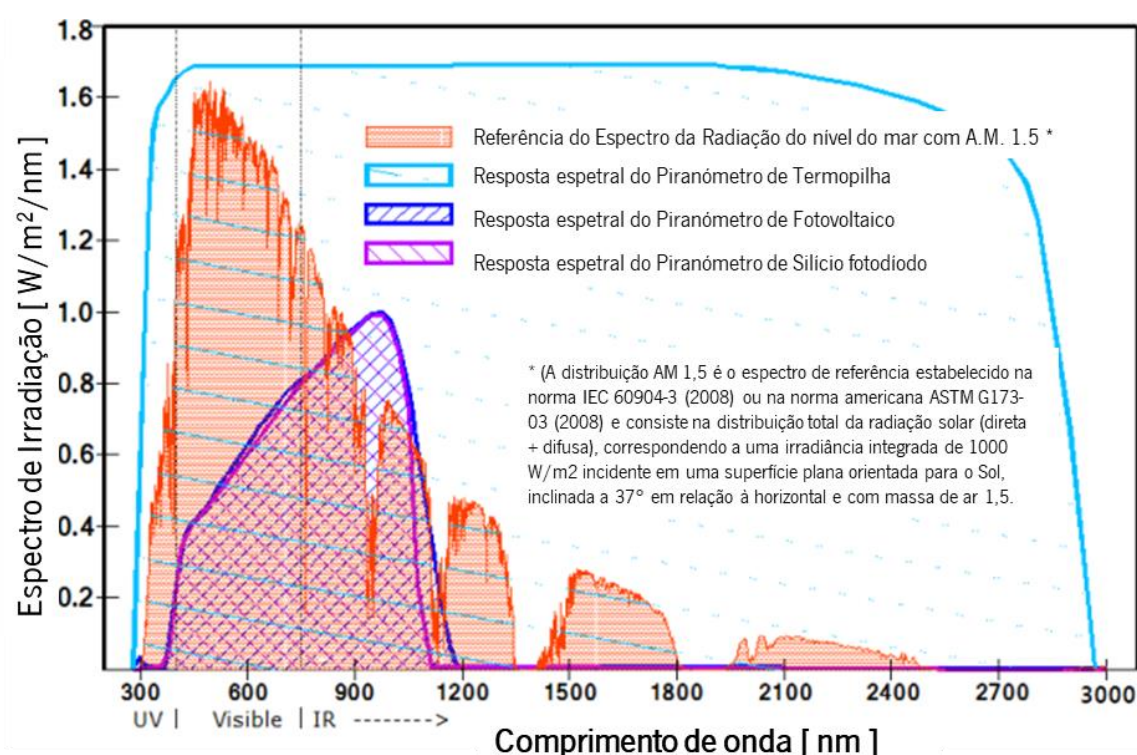


Figura 17: Comparação do espectro da radiação solar com as respostas espectrais do piranômetro de termopilha e do piranômetro de silício. Fonte: Instituto Solar dos EUA (2023).

A sensibilidade à luz, conhecida como "resposta espectral", depende do tipo de piranômetro, a figura 15 mostra as respostas espectrais dos três tipos de piranômetro em relação ao Espectro de Radiação Solar. O Espectro de Radiação Solar representa o espectro da luz solar que atinge a superfície da Terra ao nível do mar, ao meio-dia com massa de ar = 1.5 (A.M.). A latitude e a altitude influenciam esse espectro. O espectro é influenciado também pelo aerossol e pela poluição.

Como observado na figura anterior, o piranómetro de silício não é tão uniforme e abrangente na gama espectral. Ao contrário do piranómetro de termopilha, não está abrangido pela norma ISO 9060 e os seus métodos de calibração não estão normalizados, o que dificulta as comparações diretas com os piranómetros de termopilha em termos de precisão.

Por conseguinte, o piranómetro de termopilha é altamente recomendado. É de salientar que a Organização Meteorológica Mundial (OMM) também classifica os piranómetros em três categorias: "alta qualidade", "boa qualidade" e "qualidade moderada". A principal diferença entre esta classificação e a ISO é a exigência de aproximadamente o dobro da resposta espectral (Hukseflux, 2023; Solar Energy: Specification and Classification of Instruments for Measuring Hemispherical Solar and Direct Solar Radiation, 1990). De acordo com o livro "Solar and Infrared Radiation Measurements" de Vignola, Michalsky e Stoffel (2019) (Vignola *et al.*, 2019) um desalinhamento de $0,5^\circ$ no nivelamento do equipamento para incidência solar com ângulo zenital de 30° corresponde a um erro de 0,1%, e para incidência solar com ângulo zenital de 80° , o erro aumenta para 1,2%. Por conseguinte, é crucial garantir que o piranómetro está devidamente nivelado e montado de forma segura.

A gama de medição dos piranómetros deve situar-se entre 0,28 e 2,80 μm , com valores de irradiância de saída entre 0 e 1400 W/m^2 e um tempo de resposta de um segundo. Recomenda-se a utilização correta do piranómetro, uma vez que, quando virado para cima, mede a energia solar radiante total incidente numa superfície horizontal por unidade de tempo e de área, e quando virado para baixo, mede a energia solar radiante total refletida pela sua superfície por unidade de tempo e de área. Este tipo de piranómetro tem normalmente uma cúpula dupla para minimizar os efeitos da convecção interna resultante da inclinação do piranómetro em diferentes ângulos. Dependendo do tipo de equipamento, os dados do piranómetro poderão ter de ser convertidos da sua saída analógica para digital por um medidor de leitura, com uma precisão de $\pm 0,5\%$ e uma resolução de 1 W/m^2 (G183 Standard Practice for Field Use of Pyranometers, Pyrhemimeters and UV Radiometers, 2023).

O equipamento deve ser colocado a uma distância mínima de 50 cm da superfície em análise, sendo que esta distância irá influenciar as dimensões da amostra. As dimensões da amostra (diâmetro ou comprimento do lado) devem ser pelo menos oito vezes essa distância.

Assim, se a amostra for circular, deve ter um diâmetro mínimo de 4 m, e se for quadrada, os seus lados devem ter pelo menos 4 m. Isto torna o método adequado para avaliar ruas, telhados, entre outras grandes superfícies (G183 Standard Practice for Field Use of Pyranometers, Pyrhemimeters and UV Radiometers, 2023). Por fim, é essencial referir que esta metodologia (ASTM E1918) (2023) só deve ser aplicada em dias claros e ensolarados, sem nuvens ou nevoeiro durante as medições, e as superfícies das amostras devem ser homogêneas e secas (Akbari *et al.*, 2008; ASTM E1918-21, 2023; Levinson *et al.*, 2010a, 2010b, 2020).

2.4. Enquadramento regulamentar

2.4.1. Enquadramento legal do ruído ambiental em Portugal e na União Europeia

A Comissão Europeia criou em 1998, uma rede de peritos de ruído da UE de modo a prestar assistência no desenvolvimento da política europeia de ruído. Em 2002, o Parlamento Europeu e o Conselho adotaram o Ruído de Ambiente Europeu (Diretiva 2002/49/CE). Esta diretiva foi transposta pelo Decreto-Lei nº 9/2007, e foi um grande passo para monitorizar o ruído urbano, exigindo aos estados-membros da EU a produção de mapas de ruído estratégicos, para as principais fontes de poluição sonora e aglomerações com mais de 250.000 habitantes (Diretiva 2002/49/CE, 2002).

Em Portugal, o ruído está regulamentado através do Regulamento Geral do Ruído (RGR), publicado no Decreto-Lei nº 9/2007 e introduz, à semelhança do seu antecessor o Decreto-Lei 292/2000 a consideração da variável do ruído urbano em sede de planeamento.

O Decreto-Lei nº 9/2007 define as áreas vocacionadas para os usos habitacionais existentes ou previstos e as outras estruturas de uso coletivo específico (escolas, hospitais, espaços de lazer...) que o regulamento classifica como **zonas sensíveis** e classifica como **zonas mistas** as áreas que para além das utilizações referidas, contempla também áreas de comércio e de serviços.

O regulamento define três períodos de dia (diurno compreendido entre as 7h00 e as 20h00, o período entardecer compreendido entre as 20h00 e 23h00 e o período noturno compreendido entre as 23h00 e as 7h00) e quatro indicadores de ruído ambiente de longo termo que são o L_{dia} (indicador de ruído diurno), $L_{entardecer}$ (indicador de fim de- tarde, período intermédio), o L_{noite} (indicador noturno) e o L_{den} (indicador composto dos três períodos: dia-entardecer-noite)(Decreto-Lei nº 9/2007, 2007).

Estes indicadores são determinados para o conjunto dos períodos diurnos, intermédios e noturnos de um ano, e em particular o L_{den} (indicador de ruído ambiente composto), traduz de uma forma mais aproximada o incómodo global associado, ao calcular um nível sonoro contínuo equivalente de 24 horas ponderado distintamente nos períodos de entardecer e noite.

Nos termos do Regulamento Geral de Ruído, às zonas sensíveis e mistas estão associados valores máximos admissíveis de ruído ambiente no exterior, nomeadamente que as zonas sensíveis não devem ficar expostas a um L_{den} (A), superior a 55 dB(A) e a um L_n (A) superior a 45 dB(A); as zonas mistas não devem ficar expostas a um L_{den} (A) superior a 65 dB(A), e a um L_n superior a 55 dB(A).

Os regulamentos nacionais definem na avaliação do ruído ambiente o uso de indicadores médios de ruído que caracterizam o ambiente acústico exterior. Nomeadamente, o nível sonoro contínuo equivalente (**Leq**), por ser o mais representativo do ruído observado num determinado local e durante um certo intervalo de tempo é o indicador mais adotado e é definido como o nível de pressão sonora constante, no qual a quantidade de energia acústica emitida durante um determinado período de tempo é a mesma do que o ruído flutuante efetivo emitido (L. Silva, 2009).

2.4.1.1. Evolução legislativa acústica em Portugal

Em 1984, surgiu em Portugal a primeira regulamentação com o Decreto-Lei n.º 271/84 de 6 de agosto, que estabelecia alguns parâmetros construtivos para edifícios destinados a espetáculos (interiores e ao ar livre) na perspetiva de controlar a poluição sonora. Mas foi só em 1987, que foi aprovado o Regulamento Geral sobre o Ruído com o Decreto-Lei n.º 251/87 de 24 de junho, no entanto foi o Decreto-Lei n.º 292/2000 de 14 de novembro que inclui a variável ruído em sede de planeamento e a aprovação do Regulamento Geral do Ruído.

Em Portugal, com a transposição da Diretiva 2001/42/CE, relativa à Avaliação Ambiental Estratégica, coloca-se novos desafios e oportunidades no domínio do Ruído Ambiental, e com a introdução do Regulamento Geral do Ruído iniciou-se a elaboração de Planos Municipais de Redução de Ruído, de acordo com o mesmo regulamento e mais de 200 municípios dispõem já de um Mapa de Ruído Municipal.

A Diretiva n.º 2002/49/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de junho, relativa à avaliação do ruído ambiente é transposta pela ordem jurídica interna através do Decreto-Lei n.º 146/2006 de 31 de julho. No entanto é o Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de janeiro, que revoga o regime legal da poluição sonora do Decreto-Lei n.º 292/2000, e aprova o novo RLPS - Regulamento Legal da Poluição Sonora.

Atualmente com entrada em vigor do Decreto-Lei n.º 136-A/2019 de 6 de setembro, que transpõe para a legislação nacional a Diretiva (UE) 2015/996, altera o regime de avaliação e gestão do ruído ambiente, como é possível verificar na evolução dos regulamentos acústicos da Figura 18.

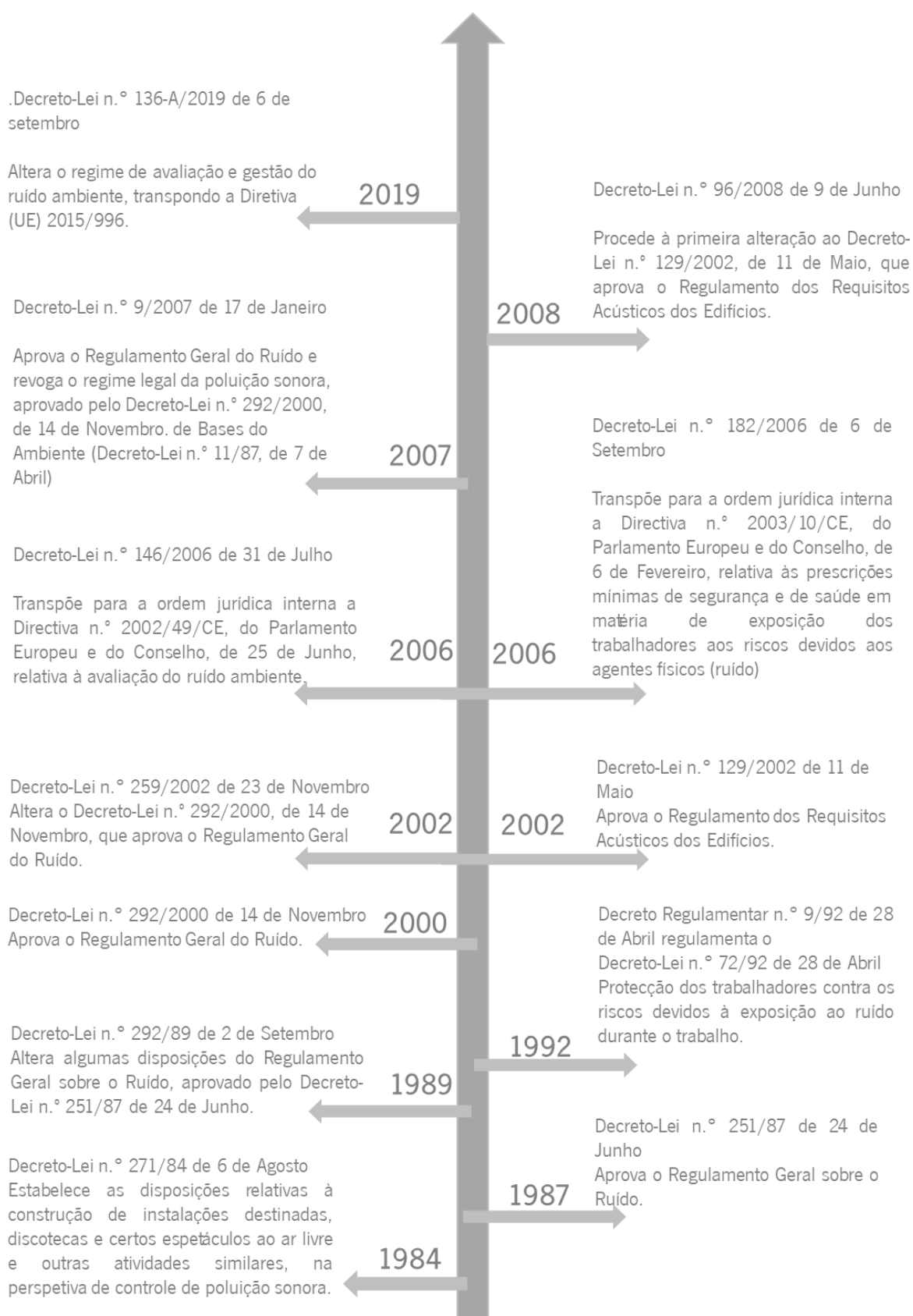


Figura 18: Cronograma da Evolução Regulamentar em Portugal em termos de ruído ambiental e acústica

2.4.2. Enquadramento legal do comportamento térmico dos edifícios em Portugal e na União Europeia

A União Europeia no sentido de reduzir os consumos energéticos mundiais incentiva/regulamenta recomendações que visam a melhoria da qualidade dos edifícios e a eficiência energética como estratégia para reduzir os consumos de energia. A diretiva 2010/31/UE de 19 de maio de 2010 retrata essas recomendações em forma de legislação comunitária.

Os estados-membros da União Europeia (EU) necessitavam de uma harmonização das metodologias nas Normas Europeias, sobretudo para dar resposta aos requisitos e às imposições da Diretiva 2010/31/EU. Nesse sentido, foram criadas as normas CEN EPBD pelo Comité Europeu de Normalização (CEN).

As normas CEN EPBD e o CEN pretendem promover uma metodologia que classifique, analise e otimize o desempenho energético dos edifícios de acordo com as diretrizes da diretiva 2010/31/EU.

Por outro lado, as normas CEN-EPBD, conjugadas com a EN 15603 e a EN 15217 (ambas normas do quadro da EPBD) promovem a transparência e tornam comparáveis os requisitos do desempenho energético nos diferentes países da EU.

Os países da União Europeia, de modo a respeitarem os requisitos dos cálculos energéticos estabelecidos na Diretiva Europeia 2010/31/UE e nas normas europeia CEN e a internacional ISO, tiveram que realizar alterações importantes nas normas nacionais. Estas alterações foram significativas em alguns países, mas em outros significaram apenas aperfeiçoamentos dos requisitos de desempenho energético dos edifícios.

A União Europeia aplica uma metodologia para o cálculo do desempenho energético dos edifícios de acordo com o quadro geral comum determinado no Anexo I da Diretiva Europeia 2010/31/UE, a qual determina as regras em relação à formulação do cálculo utilizado para determinar o desempenho energético dos edifícios. A implementação da EPBD tem como objetivo o desenvolvimento de uma estratégia comum no sentido de obter edifícios com gastos de energia quase zero (NzEB) a partir de 2020.

Os edifícios de balanço energético nulo (NZEB - Net-Zero Energy Building) e/ou quase nulo (nZEB near Zero Energy Building), devem aumentar o seu desempenho energético e reduzir as suas necessidades de energia para quase nulas e por fontes de energia renováveis (Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação), 2010).

2.4.2.1. Evolução legislativa térmica em Portugal

Antes de 1990, em Portugal, não existiam quaisquer requisitos térmicos na edificação, foi com o Decreto-Lei n.º 40/90, que foi criado o primeiro instrumento legal térmico, nomeadamente o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) (RCCTE, 1990).

A União Europeia e os estados-membros no sentido de reduzir a emissão dos gases, como o dióxido de carbono para a atmosfera definiram através do protocolo de Quioto metas na utilização racional dos recursos energéticos.

Em 2002, surgiu a diretiva europeia 2002/91/CE com o conceito de relativo ao desempenho energéticos dos edifícios “Energy Performance of Buildings Directive” instituindo requisitos mínimos para o edificado (novo e o existente). Como o sector residencial era responsável por mais de 40% do consumo final de energia da EU, a diretiva 2002/91/CE indicava que até janeiro de 2006, todos os estados-membros deveriam implementar as exigências regulamentares (Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 (EPBD), 2002).

Assim sendo, Portugal, procedeu à revisão do RCCTE em 2006 com o Decreto-Lei n.º 80/2006), impondo limites aos consumos e tipo de uso (Decree-Law No 80/2006 Regulation of Thermal Behavior Characteristics of Buildings (RCCTE)., 2006) e procedeu também ao Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização (RSECE) com o Decreto Lei 79/2006, que pretendia induzir medidas de racionalização de modo a evitar o sobredimensionamento e para tal fixou limites à potência máxima dos sistemas a instalar num edifício (RSECE, 2006).

Em 2013, Portugal integrava num único diploma o REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (antigo RCCTE) e o RECS - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (antigo RSECE), com a publicação do Decreto-Lei n.º 118/2013, que garantia não só a transposição da Diretiva n.º 2010/31/UE, como também uma revisão da legislação nacional ou a promoção do desempenho energético dos edifícios através do Sistema Certificação Energética dos Edifícios (SCE) ((SCE, REH, RECS), 2013).

A transposição para a legislação nacional da Diretiva Europeia 2010/31/UE foi através do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto, que inclui o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), em vigor desde 30 de novembro de 2013 que procedeu a várias alterações em 2015 e em 2016 (ver na Figura 17 a evolução da legislação nacional em questões térmicas).

A harmonização e a atualização da legislação nacional (energética) teve como objetivo não só entrar em conformidade com as normas europeias, mas também promover a eficiência energética dos edifícios, sua sistematização e âmbito de aplicação.

No contexto português, para estimar o consumo energético dos edifícios foi necessário adequar o método de cálculo das normas europeias CEN e a norma internacional ISO 13790 à tipologia de construção portuguesa.

Por outro lado, os requisitos mínimos da qualidade térmica do edifício são determinados pelo REH, bem como os parâmetros de desempenho ou as metodologias de caracterização do comportamento térmico (eficiência energética).

A implementação da nova EPBD (Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios) na regulamentação portuguesa teve como objetivo principal desenvolver gradualmente os regulamentos nacionais de modo a atingir-se o objetivo de energia zero nos edifícios novos a partir de 2020 (Decreto-Lei n.º 118/2013 (SCE, REH, RECS), 2013). Em Portugal, a introdução da nova EPBD e do nZEB na legislação nacional ocorreu através do DL n.º 118/2013 que, entretanto, foi revisto em 2015, ajustando as exigências mínimas em função dos resultados dos cálculos dos níveis ótimos de rentabilidade (David, 2015).

A revisão da legislação alertou para a necessidade de levar em consideração os requisitos mínimos dos sistemas técnicos e da envolvente dos edifícios de forma a reduzir perdas térmicas e aumentar a qualidade e a durabilidade das construções edificadas e a sua evolução está refletida no cronograma da Figura 19.



Figura 19: Cronograma da Evolução da Regulamentação térmica em Portugal

2.5. Correlação entre forma urbana, ruído urbano e radiação solar

Uma solução mista (variável térmica e acústica) ponderada pode ser inovadora e levar a uma construção habitacional mais sustentável, tendo em vista os aspetos funcionais relacionados com o conforto da habitação, como sendo a iluminação natural, a térmica e a acústica (Mendonça & Bragança, 2007). Estes parâmetros devem ser salvaguardados e integrados num todo (Mendonça, 2005; Keeler & Burke, 2009).

Em termos regulamentares a correlação entre forma urbana, ruído e radiação solar poderá ser aplicada, como no caso francês, onde as classes de ruído são classificadas por convenção segundo a distância máxima entre o tipo de fonte sonora e o edificado (Décret no 2012-111, 2012). Em que o fator solar de referência calculado, depende da sua exposição ao ruído, da sua orientação, inclinação, da zona climática e de onde se insere o edifício (Document Technique Réglementaire, 1998).

2.5.1. O caso francês

O governo francês propôs integrar o ruído na regulamentação térmica e proceder à sua categorização, incluindo o ruído do tráfego. As infraestruturas de transportes terrestres (neste caso rodoviário) na proximidade dos edifícios estão divididas e classificadas em diferentes categorias. Esta categorização das vias é determinada por portaria municipal, com base no decreto n. 95-21 de 9 de janeiro de 1995 (Décret n°95-21, 1995).

A integração do ruído no próprio regulamento térmico está associada à determinação da classificação BR, que é efetuada vão a vão utilizando o Anexo 2 do Decreto RT2000 (Arrêté du 29 novembre 2000 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments - Légifrance (Annexe II-RT2000), 2000). A avaliação é feita em função da distância entre a fachada estudada e a infraestrutura, da vista de uma infraestrutura a partir de um vão e da presença de um obstáculo, da distância da fachada à infraestrutura, sendo considerada a mais curta em relação ao bordo exterior (como a área de influência da propagação do ruído).

A avaliação e classificação são efetuadas por fachada e se todos os vãos da fachada avaliada estiverem à mesma distância e vista da infraestrutura têm a mesma classificação.

Os resultados da avaliação são definidos por classes BR1, BR2, BR3 baseadas na classificação da categoria de infraestrutura de transporte terrestre nas proximidades da construção, conforme sintetizado na Tabela 12.

Tabela 12: classificação da categoria de infraestrutura de transporte terrestre Fonte:(IZUBA, 2024)

Categoria da Infraestrutura	Distância entre o vão e a Infraestrutura de transporte Terrestre						
Categoria 1	0-65 m	65-125 m	125-250 m	25-400 m	400-550 m	550-700 m	>700 m
Categoria 2	0-30 m	30-65 m	65-125 m	125-250 m	250-370 m	370-500 m	>500 m
Categoria 3		0-25 m	25-50 m	50-100 m	100-160 m	160-250 m	>250 m
Categoria 4			0-15 m	15-30 m	30-60 m	60-100 m	>100 m
Categoria 5				0-10 m	10-20 m	20-30 m	>30 m
Via de infraestrutura depois do vão							
Vista direta	BR3	BR3	BR3	BR3	BR2	BR2	BR1
Vista Parcial ou vista mascarada por obstáculos pouco protetores	BR3	BR3	BR3	BR2	BR2	BR1	BR1
Vista Mascarada muito protegida pelos obstáculos	BR3	BR3	BR2	BR2	BR1	BR1	BR1
Vista Traseira	BR3	BR2	BR2	BR1	BR1	BR1	BR1

A fim de proteger os ocupantes dos edifícios situados na proximidade de estradas e caminhos-de-ferro de grande tráfego, o decreto de 30 de maio de 1996 (alterado pelo decreto de 23 de julho de 2013) especifica as modalidades de classificação destas infraestruturas de transporte terrestre, determinando as exigências mínimas de isolamento acústico das divisões principais e das cozinhas das habitações situadas nas zonas de perturbação (Légifrance, 1996).

As estradas são classificadas por decreto municipal. Os níveis de isolamento exigidos em frente dos edifícios dependem:

- da via em questão (categoria de infraestrutura),
- da zona de incomodidade de cada lado da via,
- da distância do edifício em relação à via
- da presença de eventuais obstáculos na zona (outros edifícios existentes ou a construir no mesmo programa, por exemplo).

Na proximidade de linhas rodoviárias e ferroviárias de alta velocidade (entre 0 e 10 metros), os valores mínimos de isolamento da fachada exigidos são os apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Relação de Categoria de Infraestrutura com os níveis de ruído e isolamento acústico mínimo Fonte: (Ministère du Partenariat avec les territoires et de la Décentralisation 2020)

Categoria de Infraestrutura	Nível de ruído de referência diurno L_{Aeq}^* * Leq(A) (Nível Sonoro Contínuo Equivalente): nível sonoro contínuo durante um determinado período, neste caso das 6h às 22h.	Isolamento mínimo $D_{nT,A,tr}^*$ em dB *D nTA,tr é valor que caracteriza o isolamento de uma sala do exterior ou seja, o isolamento contra ruídos aéreos externos: tráfego rodoviário ou ferroviário, ruído de aeronaves
1	$L > 81 \text{ dB(A)}$	45 dB
2	$76 < L \leq 81 \text{ dB(A)}$	42 dB
3	$70 < L \leq 76 \text{ dB(A)}$	38 dB
4	$65 < L \leq 70 \text{ dB(A)}$	35 dB
5	$60 < L \leq 65 \text{ dB(A)}$	30 dB

Em termos de integração dos requisitos acústicos (proteção ao ruído) nas exigências do regulamento térmico, como vai ser possível verificar na Figura 20, a evolução da regulamentação térmica em França, incorpora as classes de categoria de infraestrutura (BR).

As classes são definidas pela distância e posição relativa à fonte de ruído, neste caso rodoviária, e como isso é traduzido numa necessidade de isolamento acústico (dos vãos envidraçados) para obter a máxima redução possível das necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício.

2.5.2 Evolução legislativa térmica em França

RE 2020

RE 2020 tem como requisitos: o consumo máximo de aquecimento de 12 kWh/m² por ano; o consumo total de energia primária inferior a 100 kWh/m² por ano e um gasto de energia de 0 kWh/m² por ano com produção de energia renovável que cubra, pelo menos, as necessidades da casa.

RT 2012 é o regulamento em vigor desde 1º de janeiro de 2013. Com algumas exceções, aplica-se a todos os projetos de construção em França. Muito exigente, o RT2012 baseia-se no antigo rótulo BBC (Low Consumption Building). RT 2012 é uma resposta ao Grenelle de l'environnement e define um novo limite para o consumo de energia, é fixado em 50 kWh/m² / ano.

Para cumprir a RT 2012, os fabricantes devem:

- tratar o edifício para obter permeabilidade ideal ao ar;
- eliminar pontes térmicas durante a construção;
- atingir um determinado nível de eficiência energética para aparelhos de aquecimento, refrigeração e iluminação;
- utilizar instalação com recurso a energias renováveis (painéis solares, bomba de calor)
- realizar um teste de estanqueidade no final do projeto.

Além disso, a RT 2012 promove projetos bioclimáticos :

- as salas estão viradas a sul, onde o sol está mais presente;
- as superfícies envidraçadas devem representar pelo menos 1/6 da área habitacional total;
- salas "frias", como adegas, garagens, etc. estará localizado na parte norte do edifício.

Durante a implantação do RT 2012, surgiu o coeficiente Bbio. Isto envolve calcular a eficiência energética de novas construções.

O RT 2012 também requer um Tic, ou temperatura interior convencional, que não exceda um limite de referência (Tic ref). Este já era o caso do RT 2000, mas os limiares foram reduzidos ao longo da regulamentação. As partes interessadas na construção devem então garantir que o projeto respeita as TIC (proteção solar, melhor inércia do edifício, etc.). Isto permite oferecer aos ocupantes um conforto térmico ideal durante as estações cada vez mais frequentes de fortes ondas de calor. **A determinação da classificação BR para novos edifícios a definição de obstáculos é diferente no decreto RT2012.**

RT 1988 AMPLIAÇÃO PARA EDIFÍCIOS TERCIÁRIOS

Este novo regulamento inclui requisitos mínimos de desempenho para a envolvente e os sistemas implementados. O RT 1988 é estendido aos edifícios não residenciais.

RT 1974 entrou em vigor em 1º de maio de 1974. Aplicando-se apenas a novos edifícios residenciais, o seu objetivo é reduzir o consumo de energia dos edifícios em 25% (para atingir 225 kWh/m² por ano). Para tal, o RT 1974 exigiu apenas a instalação de uma fina camada de isolamento e a instalação de regulação automática dos sistemas de aquecimento. Ao mesmo tempo, são definidas três zonas climáticas, A, B e C, para diferenciar as cidades de acordo com o seu clima (estão listadas no anexo ao decreto de 10 de abril de 1974). Assim, é concedida uma tolerância para as zonas geográficas mais frias (Nordeste, regiões montanhosas, etc.).

2015

O RT 2015 foi, abandonado, em favor de um RT 2012 revisto, onde flexibilizou os requisitos da RT 2012 para os edifícios.

novas construções com menos de 25 m² no terreno; edifícios atípicos cuja regulamentação em vigor não possa ser integralmente respeitada.

2005

TR 2005 RT 2005, TENDO EM CONTA O BIOCLIMATISMO E AS ENERGIAS RENOVÁVEIS

Este regulamento retoma os fundamentos do RT2000, com aumento dos requisitos de consumo e salvaguardas. O RT2005 visa uma redução adicional de 15% no consumo de energia de novos edifícios e ampliações. **A classificação BR permite ainda, definir o fator solar máximo dos envidraçados a implementar.**

2000

RT 2000 O RT 2000, ADIÇÃO DE UM REQUISITO DE CONFORTO NO VERÃO

Ao contrário dos regulamentos anteriores, que apenas impunham requisitos de recursos, o RT2000 vê surgir um requisito de desempenho global do edifício, mas também de conforto no verão, através do coeficiente TIC. O RT2000 visa uma redução de 20% no consumo máximo da habitação face ao RT 1988 e uma redução de 40% no consumo dos edifícios terciários. **A determinação da classificação BR é efetuada vão a vão através da aplicação do anexo 2 do decreto RT2000**

1988

1982

RT 1982 entrou em vigor em setembro de 1982.

partir de agora, as novas construções residenciais não devem exceder um limite de consumo de energia fixado em 170 kWh/m² por ano. A instalação de um sistema de ventilação é obrigatória. A ventilação deve ser permanente (durante todo o ano) podendo ser mecânica ou natural.

Ao mesmo tempo, é criado o coeficiente B (B para necessidades de aquecimento) que complementa o coeficiente G. Permite calcular as necessidades de aquecimento ao longo de um ano. Expresso em W/m³ .°K, leva em consideração a entrada de calor livre, como o reflexo do sol nas janelas ou mesmo a atividade humana no interior da casa.

As zonas climáticas A, B e C são agora denominadas H1, H2 e H3 (este ainda é o caso hoje). No regulamento foi criado um mapa que representa a divisão das zonas climáticas na França.

Figura 20: Evolução regulamentar térmica-acústica em França

2.5.2.1 Caracterização da regulamentação térmica francesa

A transposição da Diretiva Europeia 2010/31/UE no caso francês foi aprovada pela Lei Grenelle I - Decreto nº 2010-1269 de 26 de outubro de 2010, e o Decreto nº 20121530, de 28 de dezembro de 2012, e entrando em vigor a Réglementation Thermique RT 2012, que define as características térmicas e o desempenho energético dos edifícios novos, descreve três exigências de resultados em termos de eficiência energética (Bbio e Bbio_{max}), conforto de verão (Tic e Tic_{ref}) e consumo de energia primárias (Cep e Cempax), representado na Figura 21.

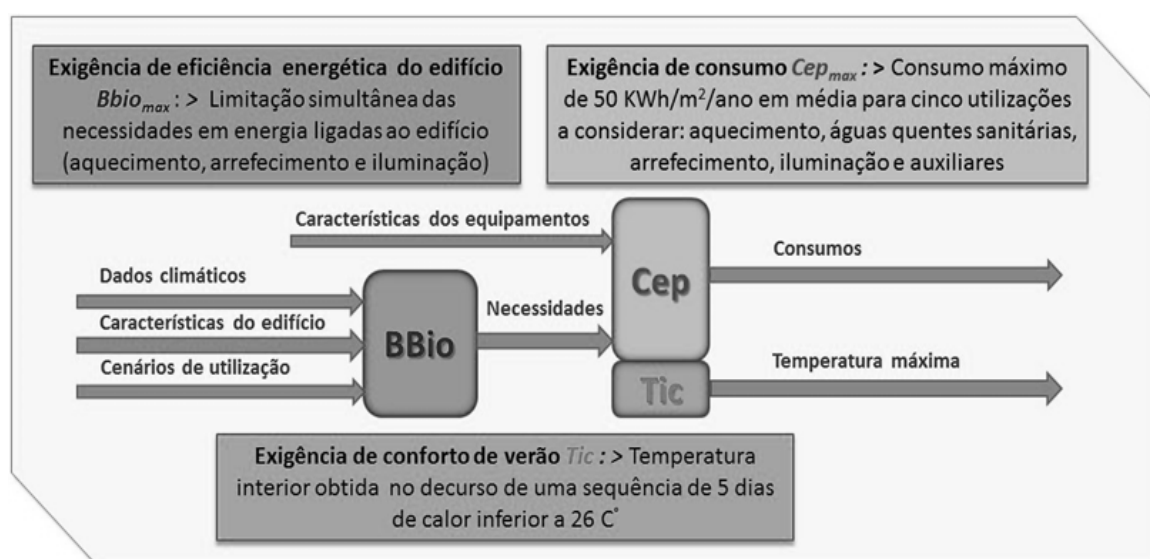


Figura 21: Os três requisitos gerais da RT 2012 Fonte: (Lopes, 2016) Adaptado de planbatimentdurable.fr@ (2013))

O método Th-BCE 2012 define as regras para o cálculo dos três indicadores Bbio, Cep e Tic para a verificação da conformidade do edifício com o RT 2012. O método é baseado numa abordagem orientada para o “objeto”, cujo princípio é descrever cada componente em termos de parâmetros; de entradas e de saídas. Assim sendo:

- Bbio é o coeficiente adimensional e é expresso em número de pontos e representa a necessidade convencional de energia bioclimática de um edifício para aquecimento, refrigeração e iluminação artificial. O coeficiente Bbio_{max} do edifício ou parte de um edifício é determinado da seguinte forma:

$$Bbio_{max} = Bbio_{maxmean} \times (M_{bgeo} + M_{balt} + M_{bsurf}) \quad (9)$$

Em que:

$B_{bio_maxmean}$: valor médio do B_{bio_max} definido por tipo de edifício ou parte de edifício e por categoria CE1/CE2;

M_{ggeo} : coeficiente de modulação de acordo com a localização geográfica;

M_{balt} : coeficiente de modulação em função da altitude;

M_{bsurf} : para edifícios comerciais e estabelecimentos desportivos, coeficiente de modulação em função da superfície do edifício ou parte do edifício;

Os valores de $B_{bio_maxmean}$ e os coeficientes de modulação estão definidos no Anexo VIII. Para edifícios com várias zonas, definidas pela sua utilização, o B_{bio_max} do edifício é calculado proporcionalmente ao S_{RT} de cada zona, a partir do B_{bio_max} das diferentes zonas.

- Cep é o coeficiente em kWh/(m².ano) de energia primária, que representa o consumo de energia convencional de um edifício para aquecimento, arrefecimento, produção de água quente sanitária, iluminação artificial de instalações, aquecimento, arrefecimento, água quente sanitária e auxiliares de ventilação, dedução efetuada à eletricidade produzida de forma permanente. O consumo máximo de energia primária convencional do edifício ou parte de edifício, Cep_{max} , é determinado da seguinte forma:

$$Cep_{max} = 50 \times M_{ctype} \times (M_{ggeo} + M_{balt} + M_{bsurf} + M_{cGES}) \quad (10)$$

Em que:

M : coeficiente de modulação em função do tipo de edifício ou parte de edifício e da sua categoria CE1/CE2;

M_{ggeo} : coeficiente de modulação de acordo com a localização geográfica;

M_{balt} : coeficiente de modulação em função da altitude;

M_{bsurf} : para edifícios comerciais e estabelecimentos desportivos, coeficiente de modulação em função da superfície do edifício ou parte do edifício;

M_{cGES} : coeficiente de modulação em função das emissões de gases de efeito estufa provenientes das energias utilizadas.

Os valores dos coeficientes de modulação estão definidos no Anexo VIII. Para edifícios com várias zonas, definidas pela sua utilização, o Cepmax do edifício é calculado proporcionalmente ao S_{RT} de cada zona, a partir do Cepmax das diferentes zonas.

- Tic é calculado usando dados climáticos convencionais para cada zona climática. O cálculo é preciso desde que todos os parâmetros de entrada tenham sido levados em consideração: os elementos que definem o edifício (dimensões exatas, superfícies, orientação, janela, materiais, etc.), os equipamentos (sistema de aquecimento, iluminação, ventilação, etc.) e outros parâmetros ditos de “integração” (dados meteorológicos, altitude, cenários de ocupação presumida, etc.). As características a ter em conta para o cálculo do Tic_{ref} é a temperatura interior convencional de referência atingida no verão, é o valor horário máximo durante o período de ocupação da temperatura operacional, calculado para o edifício de referência. Para o setor residencial o período de ocupação considerado é o dia inteiro. É calculado adotando dados climáticos convencionais para cada zona climática.
- O Tic_{ref} é calculado, para o edifício de referência, de acordo com o método de cálculo Th-BCE 2012 aprovado por despacho do Ministro responsável pela construção e habitação e do Ministro responsável pela energia. As características do edifício de referência são as utilizadas para calcular o Bbio do projeto de edifício e ainda segundo o Anexo X do Despacho de 28 de dezembro de 2012 relativo às características térmicas e requisitos de desempenho energético de edifícios novos e partes novas de edifícios não abrangidos pelo artigo 2.º do decreto de 26 de outubro de 2010 relativo às características térmicas e desempenho energético das construções, define que:
 - fator solar de referência para paredes opacas e ligações periféricas é 0,02;
 - fator de transmissão de luz de referência é considerado igual ao fator solar de referência;
 - fator solar de referência dos vãos é definido na tabela abaixo, em função da sua exposição ao ruído, da sua orientação e da sua inclinação, bem como da zona climática e da altitude e os seus valores variam entre 0,00-0,65 (Annexe II - Arrêté du 28 décembre 2012 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments non visés à l'article 2 du décret du 26 octobre 2010, 2012).

A RT 2012 (artigo 7 ° do decreto-lei de 26 de outubro de 2010) considera um edifício em conformidade se corresponder às exigências de resultados (artigo 5 ° definição do BBio), (artigo 4 definição do Cep), (artigo 6 ° definição do Tic) definidas no Decreto n° 2010-1269 de 26 de outubro de 2010 (Décret n° 2010-1269 - Légifrance, 2010).

2.5.2.2 Consequências da implementação da regulamentação europeia

A transposição para a legislação francesa da Diretiva Europeia 2010/31/UE de acordo com a Lei Grenelle 1, a regulamentação térmica RT 2012, teve como objetivo reduzir o consumo energético do edifício. A regulamentação térmica “Grenelle do Ambiente 2012” estabelece um consumo de energia primária limitado a 50 kW/m². ano e uma redução das emissões de dióxido de carbono.

Por outro lado, foi necessário implementar uma regulamentação mais acessível e simples de implementar e independente. A regulamentação térmica “Grenelle do Ambiente 2012”, implicou uma evolução do processo construtivo, introduzindo preocupações bioclimáticas e energeticamente sustentáveis (Leblond, 2015).

3. METODOLOGIA

3.1. Fundamentação epistemológica da metodologia

Diferentes filosofias e ou metodologias podem ser adotadas, independentemente do processo de pesquisa, o resultado depende do entendimento do investigador sobre o conhecimento que pretende alcançar.

O processo de investigação por meio de etapas leva a uma compreensão mais profunda do conhecimento de campo em estudo, pois permite contribuir para esse mesmo conhecimento. No trabalho proposto pretende-se abordar uma perspetiva, onde o conhecimento investigado já é validado e aceite pela comunidade científica das áreas de estudo em questão.

Considerando a filosofia epistemológica e com o propósito de recolher dados objetivos, o positivismo é a abordagem a ser levada em consideração. O investigador está focado em recolher dados objetivos, uma vez que apenas fenómenos observáveis podem gerar dados confiáveis, sendo a filosofia do positivismo a adotada nesse sentido (Saunders *et al.*, 2009).

O trabalho a ser desenvolvido será baseado na literatura existente e na área científica das áreas de investigação. Nesse sentido, a abordagem dedutiva é a mais adequada, pois o trabalho irá no sentido de validar ou refutar um conjunto de hipóteses deduzidas da revisão da literatura.

O método de investigação quantitativo apresenta-se o mais apropriado para este tipo de investigação, na medida em que as simulações e as medições das radiações e incidências que chegam à fachada são mensuráveis e podem ser apresentadas numa escala de valores.

A investigação assume também um carácter exploratório, pois tem como objetivo a identificação de formas urbanas ótimas. Estudar, parametrizar e relacionar as condições de exposição ao ruído bem como as medições da radiação solar que chega à fachada, de um dado conjunto de formas urbanas é uma realidade pouco estudada. Por ser uma relação pouco conhecida, torna-a experimental.

3.2. Processo metodológico

A sustentabilidade da forma urbana foi avaliada na ótica de otimização entre ganhos solares e redução da incomodidade causada pelo ruído, identificando os parâmetros que mais influenciam essa relação.

Ao estabelecer as questões de investigação e os objetivos do estudo procurou-se compreender como a envolvente da forma urbana pode gerar sombreamento solar e acústico.

O propósito da revisão da literatura foi explorar a relação entre a forma urbana, o ruído urbano e a radiação solar, com o objetivo de estudar o sombreamento acústico e solar. Como principais conclusões, destaca-se a relevância da forma urbana para a sustentabilidade das cidades, considerando o seu impacto ambiental, económico e social. Foram analisadas as políticas de sustentabilidade na União Europeia e em Portugal, que privilegiam a redução das emissões de GEE, o aumento da produção e utilização de energia renovável e a melhoria da eficiência energética nas áreas urbanas.

A revisão da literatura também permitiu analisar quais os parâmetros que mais influenciam a relação do ruído urbano com a forma urbana, nomeadamente, a geometria dos edifícios, a largura dos "canyons urbanos", a densidade de construção e as propriedades acústicas das fachadas. Concluindo que, a forma e a disposição dos edifícios influenciam o sombreamento acústico. No que diz respeito à radiação solar, a forma urbana tem um papel determinante na captação solar passiva, sendo essenciais fatores como a orientação dos edifícios, a densidade urbana e a configuração dos "canyons urbanos" para a otimização do sombreamento e dos ganhos térmicos.

A necessidade de efetuar um estudo preliminar teve como objetivo analisar a influência da forma urbana na radiação solar incidente nas fachadas e na exposição ao ruído, utilizando como base, o estudo de exposição ao ruído de Oliveira (2011) e o estudo de ganhos solares de Coutinho (2018), ambos tendo por base o modelo teórico de vizinhança próxima de Pedro (1999). De forma a serem comparáveis os dois parâmetros em estudo, foi utilizada uma retícula de referência com formas padronizadas e altura fixa, permitindo o cálculo de indicadores de forma que possibilitam relacionar os níveis de ruído e a radiação solar.

Foram analisadas dez formas urbanas, adaptadas do modelo de vizinhança próxima de Pedro, que ilustram diferentes tipos de implantação, sendo a maioria representações de implantação fechada, já que essas otimizam o sombreamento acústico.

Os cálculos dos indicadores de forma urbana permitiram relacionar a forma urbana com os níveis de exposição solar das fachadas e com os níveis de ruído incidente. No estudo de Oliveira (2011), foi utilizado o software CadnaA, que se baseia no método de previsão de ruído NMPB 96. A análise foi feita utilizando uma grelha quadrangular ao longo das fachadas, com células de 1,5m x 1,5m e afastamento de 0,5m. Já no estudo de Coutinho (2018), foi empregue o software Revit Solar Analysis para avaliar os ganhos solares nas fachadas em dois períodos distintos: inverno e verão.

O estudo preliminar pretende ser uma ferramenta útil para compreender como a forma urbana pode influenciar tanto os ganhos solares quanto a exposição ao ruído na envolvente vertical dos edifícios. A análise permitiu identificar quais as formas urbanas que oferecem melhor desempenho energético e acústico, evidenciando a importância dos índices urbanísticos como instrumentos de apoio ao planeamento e regulamentação de novas construções.

As configurações urbanas foram selecionadas por representarem cenários diferentes, mas sobretudo para salientar opostos em termos de desempenho solar e acústico. Configurações com volumetria simples, linear e compacta, proporcionam alta incidência solar nas fachadas, porém apresentam maior exposição ao ruído por não dispor de reentrâncias que criem zonas de sombreamento acústico. Configurações com maior complexidade volumétrica, oferecem proteção ao ruído, mas reduzem os ganhos solares. Para abordar essas “incompatibilidades”, tornou-se essencial investigar as áreas de conflito a partir dos parâmetros que definem a exposição solar e sonora. Assim, o estudo de caso escolhido contempla um quarteirão com um pátio interior, representando a forma mais favorável em termos acústicos, e o edificado envolvente, mais compacto e linear, que ilustra o melhor cenário de ganhos solares.

A validação dos modelos seguiu um procedimento integrado que combinou a recolha de dados in situ com a modelação numérica, permitindo calibrar e verificar a robustez dos algoritmos empregues. Para o ruído, foram recolhidos níveis sonoros nos pontos de validação – posicionados a 1,5 m acima do solo – juntamente com contagens manuais de tráfego nas vias circundantes, considerando a contribuição do tráfego rodoviário, topografia e fenómenos físicos na propagação das ondas sonoras. Estes dados foram inseridos no modelo

de simulação, gerando mapas de ruído que, ao serem comparados com as medições, o diferencial não poderá ultrapassar ± 2 dB(A), conforme as diretrizes da APA, validando tanto a qualidade dos dados de entrada quanto os algoritmos do modelo.

De forma análoga, a caracterização da radiação solar foi realizada utilizando simulações calibradas com medições in situ efetuadas por três dispositivos – um piranómetro de silício, um de termopilha (selecionado como referência por cumprir normas ISO) e um medidor de potência solar – todos instalados na cidade de Viana do Castelo sob condições meteorológicas uniformes. Os dados recolhidos permitiram comparar os níveis de radiação solar medidos com os obtidos na simulação, utilizando métodos como o MAE e o RMSE para quantificar o erro percentual, que na maioria dos pontos não poderá ser superior a 10%. Ajustes, tais como a definição do Albedo com base nas características dos materiais, foram incorporados para aproximar os valores simulados dos medidos. Em síntese, a validação consistiu na comparação direta entre os valores modelados e os valores reais obtidos nos pontos de controlo, demonstrando a eficácia dos modelos na representação dos níveis de ruído e radiação solar.

Propôs-se uma análise de sensibilidade, com o objetivo de avaliar a exposição das fachadas à radiação solar e ao ruído urbano, através da criação de cinco formas urbanas baseadas no estudo de caso. As condições de simulação para as duas variáveis de estudo, mantiveram-se o mais similar possíveis, através duma grelha de cálculo de 3m x 3m ao longo das fachadas e simplificando e mantendo a envolvente igual. As cinco propostas são designadas por letras e partem do estudo de caso original, que foi simplificado e reorientado para privilegiar a orientação sul, com uma rotação de aproximadamente 45°, alinhando as formas urbanas na direção norte-sul.

Para cada variação foi avaliado o estudo por fachada, por piso e por área total de fachadas. O objetivo era analisar qual o conjunto derivado do estudo de caso original, com os diferentes ajustes de áreas de pátio e extensões de fachadas que evidencia o melhor compromisso perante a exposição solar e acústica. Observar para além da otimização, o que entra em conflito com a redução da exposição ao ruído ou aumento de exposição solar.

Analisar o equilíbrio das necessidades térmico-acústicas, a partir do caso de boas praticas francês, que integra os requisitos acústicos nas exigências dos regulamentos térmicos com o objetivo de analisar soluções de compromisso.

4. ESTUDO PRELIMINAR

O estudo levado a cabo exige padrões de fácil análise e comparação, em concordância com esse facto pensou-se ser importante utilizar um estudo preliminar para testar a pertinência do estudo em questão. Assim sendo, recorreu-se a dois estudos que têm por base o mesmo modelo teórico, nomeadamente o “Modelo de Vizinhança Próxima” de Pedro (1999).

4.1. Modelo teórico: modelo de vizinhança próxima

O modelo proposto por Pedro (1999) e que designa como uma vizinhança próxima integra um conjunto de elementos (lotes, áreas de circulação, infraestruturas e áreas não urbanizáveis) que compõem uma unidade (residencial) organizada em volta de uma área exterior propícia a estabelecer proximidade na vizinhança (Coelho, 1993).

A amostra, a definição de tipos e tipologias que fundamentou a classificação elaborada por Pedro (1999) iniciou-se pela definição de critérios de classificação, sua aplicação e uma alargada amostra de exemplos resultando em unidades com características idênticas designados de tipologias e definidas segundo as duas perspetivas de classificação seguintes:

- Perspetiva programática que se define como sendo conjuntos de vizinhanças próximas com programas funcionais idênticos (por exemplo, um número de fogos idêntico);
- Perspetiva morfológica que se entende como um conjunto de vizinhanças próximas com características formais semelhantes (por exemplo, a mesma forma de implantação do conjunto de edifícios).

4.1.1 Classificação programática

A classificação de um Programa consiste num instrumento de organização que articula um conjunto de ações que concorrem para um objetivo comum preestabelecido, mensurado por indicadores estabelecidos, visando a solução de um problema, mas sobretudo, atender uma necessidade de sintetizar parâmetros classificativos como os seguintes:

- Número de fogos:
 - Inferior a 40 habitações (aproximadamente 200 habitantes) entende-se como uma vizinhança próxima de pequena dimensão;
 - Entre 40 a 70 habitações (aproximadamente 200 a 350 habitantes) entende-se como uma vizinhança próxima de média dimensão;
 - Entre 70 a 100 habitações (aproximadamente 350 a 500 habitantes) entende-se como uma vizinhança próxima de grande dimensão.

- Número de habitantes
 - Inferior a 200 habitantes por hectare entende-se como uma vizinhança próxima de baixa densidade;
 - Entre 200 a 500 habitantes por hectare entende-se como uma vizinhança próxima média densidade;
 - Superior a 500 habitantes por hectare entende-se como uma vizinhança próxima de elevada densidade.

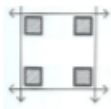
- Índice de ocupação:
 - Inferior a 50% entende-se como uma vizinhança próxima de baixa ocupação
 - Entre 50% a 100% entende-se como uma vizinhança próxima de média ocupação
 - Superior a 50% entende-se como uma vizinhança próxima de elevada ocupação

4.1.2 Classificação morfológica

A classificação morfológica vai no sentido de se indicar os constituintes morfológicos, isto é, de modo a restringir a sua amplitude. Assim os critérios utilizados por Pedro (1999) na classificação morfológica foram os seguintes:

- Forma de implantação do conjunto de edifícios:
 - Implantação fechada (os edifícios restringem a forma da área exterior, os edifícios interrompem-se numa distância igual ou inferior à quarta parte do comprimento total do perímetro do espaço exterior);
 - Implantação linear (os edifícios apenas insinuam a forma da área exterior, os edifícios interrompem-se numa distância superior à quarta parte e inferior a metade do comprimento total do perímetro do espaço exterior);

- Implantação pontual (os edifícios não restringem a área exterior, os edifícios interrompem-se numa distância superior a metade do comprimento total do perímetro do espaço exterior).
- Forma de implantação dos edifícios relativamente às ruas:
 - Implantação alinhada (implantação de edifícios ao longo de ruas);
 - Implantação não alinhada (implantação livre dos edifícios relativamente às ruas);
 - Implantação mista (implantação alinhada e não alinhada).
- Forma de acesso viário local
 - Acesso com continuidade



- Acesso em anel



- Acesso em praçeta



- Acesso em impasse



- Número de pisos acima do nível de entrada principal dos edifícios da vizinhança próxima:
 - Edifícios térreos (R/C a R/C + 1 piso, ou até 4,00m de altura)
 - Edifícios de baixa altura (R/C + 2 a R/C + 3 pisos, ou até 9,00m de Altura)
 - Edifícios de média altura (R/C + 4 a R/C + 9 pisos, ou até 28,00m de altura)
 - Edifícios altos (mais que R/C + 9 pisos, ou altura superior a 28,00m de altura)
- Número de habitações dos edifícios da vizinhança próxima:
 - Unifamiliar (uma habitação por edifício)
 - Bifamiliar (duas habitações por edifício)
 - Multifamiliar pequenos (3 a 8 habitações por edifício)

- Multifamiliar médios (9 a 20 habitações por edifício)
- Multifamiliar grandes (21 a 60 habitações por edifício)
- Multifamiliar muito grandes (mais de 60 habitações por edifício)

4.1.3 Exigências de projeto aplicáveis aos espaços da vizinhança próxima

Considerou-se pertinente manter a maioria dos parâmetros propostos por Pedro (1999) na conceção de cada um dos espaços que compõem a vizinhança próxima, que foram selecionados de forma a traduzirem a diversidade e a similaridade das formas urbanas empregues em contexto real.

Nesse sentido, os parâmetros relativos a cada um dos sistemas (edificado, circulação e não urbanizável) levam em consideração mínimos e máximos considerados e regulamentares. Nomeadamente o sistema edificado pondera a distância mínima entre fachadas e a altura máxima dos edifícios. Nos espaços de circulação é ponderado a hierarquia viária mínima, a largura da via mínima e os componentes impermeáveis mínimos da infraestrutura. Por sua vez, nos espaços verdes ou não urbanizáveis são consideradas as áreas mínimas considerados no modelo de Pedro (1999).

No Estudo 1 que será apresentado de seguida foi necessário recorrer a uma grelha que se intitulou de Área de Referência. Esta área de referência foi definida por grelha com 97,72m x 252,84m (área total bruta de 24 707,52 m² e um perímetro de 701,13 m) com o intuito de tornar comparável as diferentes formas urbanas selecionadas para o estudo.

Nesse sentido, foi necessário ajustar e replicar as formas urbanas selecionadas de forma a preencher a dita Área de Referência. Na Figura 20 até à 29 apresentam-se todas as formas empregues no estudo proposto e já replicadas.

No entanto, manteve-se e estendeu-se nas Áreas de Referência apresentadas as duas vias distribuidoras locais e as várias vias de acesso local. Para o presente cálculo foi unicamente incluída na avaliação, as vias distribuidoras locais. Cada distribuidora local tem como especificação de largura de via 2,5m como sendo a distância das linhas centrais às vias externas.

Partindo do modelo já referenciado, optou-se pelos edifícios multifamiliares de 4 pisos e optou-se pela diversificação da implantação das formas. Nesse sentido, utilizou-se pelo menos um exemplar de cada tipo de implantação, isto é, implantação fechada (Forma 1 até à Forma 8), linear (Forma 9) e pontual (Forma 10) e está representado na Figura 22.



Figura 22: Ilustração Tipo de Implantação, fechada (a) linear (b) e pontual (c) (Fonte:(Pedro, 2002))

As formas propostas para além do tipo de implantação apresentam diferentes tipos de acesso, nomeadamente com o acesso contínuo, em impasse e em anel, como é possível ver na Figura 23.

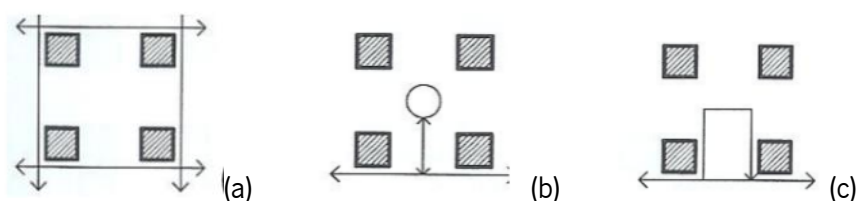
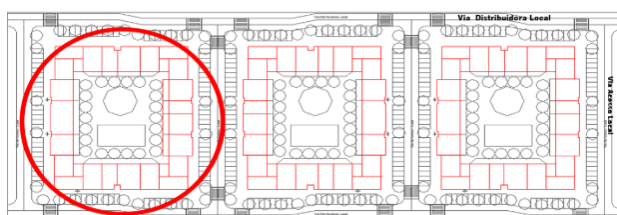


Figura 23: Ilustração Tipo de Acesso contínuo (a) impasse (b) e anel (c) (Fonte:(Pedro, 2002))

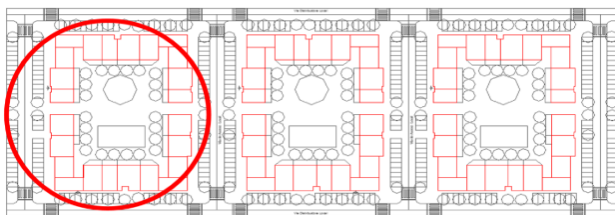
No sentido de obter uma leitura fácil, a todas as formas é dada uma designação nominal numérica (1-10) e todas as formas vão ser apresentadas com o seu protótipo em destaque (círculo vermelho) e depois o preenchimento por repetição de toda a Área de Referência, como sendo a área comum a todas as formas abordadas.

Todas as formas apresentadas e ilustradas têm a mesma Área de Referência, dispõe de duas distribuidoras locais que se desenvolvem sempre no trecho mais longo e as restantes vias fazem parte do sistema viário da Área de Referência, mas não são tidas em conta nos cálculos seguintes.



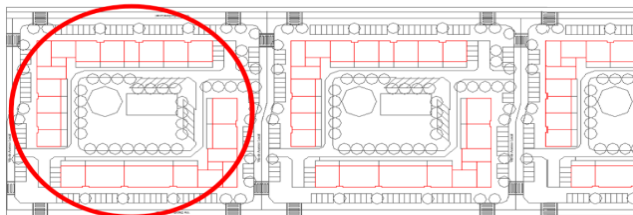
	Forma 1
Área do Patch (m²)	2110,69
Nº Patch (n≥1)	3,00
Área de Implantação (m²)	6332,07
Perímetro do Patch (m)	430,14
Raio circundante (m)	43,48
Área de Referência (m²)	24707,52

Figura 24: Ilustração da Forma 1 e Dimensões da Forma 1



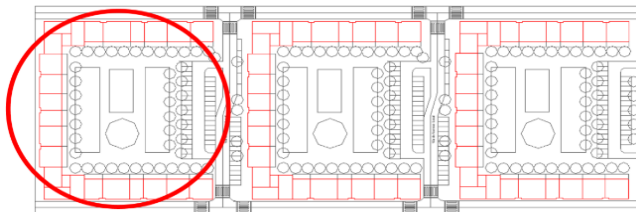
	Forma 2	
Área do Patch (m²)	1099,13	1012,80
Nº Patch (n≥1)	3,00	3,00
Área de Implantação (m²)	6335,79	
Perímetro do Patch (m)	242,37	227,20
Raio circundante (m)	36,67	35,70
Área de Referência (m²)	24707,52	

Figura 25: Ilustração da Forma 2 e Dimensões da Forma 2



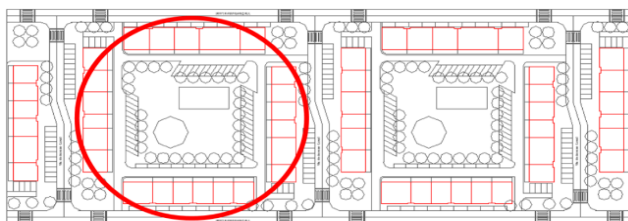
	Forma 3			
Área do Patch (m²)	1061,62	1000,8	722,5	247,7
Nº Patch (n≥1)	2,00	2,00	1,00	1,00
Área de Implantação (m²)	5095,01			
Perímetro do Patch (m)	248,00	231,60	174,8	71,59
Raio circundante (m)	42,98	40,92	30,03	13,64
Área de Referência (m²)	24707,52			

Figura 26: Ilustração da Forma 3 e Dimensões da Forma 3



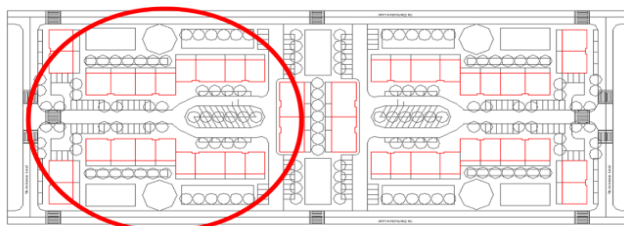
	Forma 4	
Área do Patch (m²)	1951,05	
Nº Patch (n≥1)	3	
Área de Implantação (m²)	5853,15	
Perímetro do Patch (m)	447,83	
Raio circundante (m)	54,73	
Área de Referência (m²)	24707,52	

Figura 27: Ilustração da Forma 4 e Dimensões da Forma 4



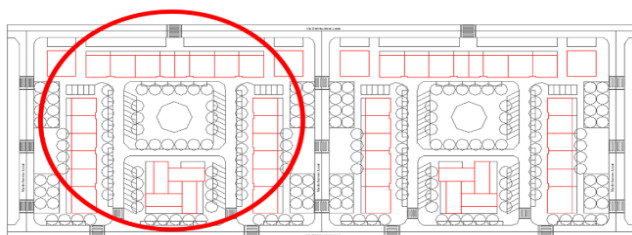
	Forma 5			
Área do Patch (m²)	559,95	520,95	527,95	567,95
Nº Patch (n≥1)	3,00	3,00	2,00	2,00
Área de Implantação (m²)	5434,50			
Perímetro do Patch (m)	135,80	128,00	129,40	137,40
Raio circundante (m)	28,64	26,72	27,07	29,03
Área de Referência (m²)	24707,2			

Figura 28: Ilustração da Forma 5 e Dimensões da Forma 5



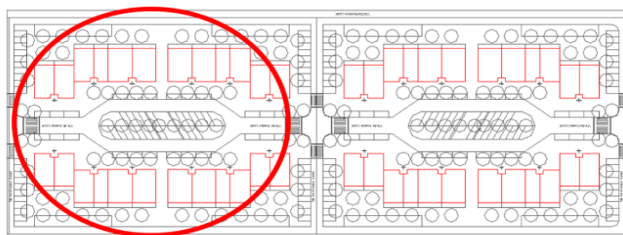
	Forma 6		
Área do Patch (m²)	198,65	722,60	316,30
Nº Patch (n≥1)	4,00	4,00	2,00
Área de Implantação (m²)	4317,60		
Perímetro do Patch (m)	61,00	181,58	85,80
Raio circundante (m)	11,18	37,37	16,72
Área de Referência (m²)	24707,52		

Figura 29: Ilustração da Forma 6 e Dimensões da Forma 6



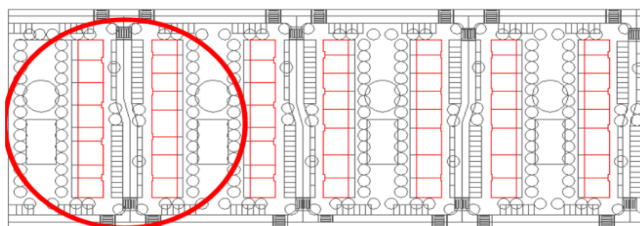
	Forma 7			
Área do Patch (m²)	520,95	133,69	710,60	383,00
Nº Patch (n≥1)	4,00	4,00	2,00	2,00
Área de Implantação (m²)	4805,76			
Perímetro do Patch (m)	128,00	46,25	167,20	95,00
Raio circundante (m)	26,72	8,18	36,15	14,75
Área de Referência (m²)	24707,52			

Figura 30: Ilustração da Forma 7 e Dimensões da Forma 7



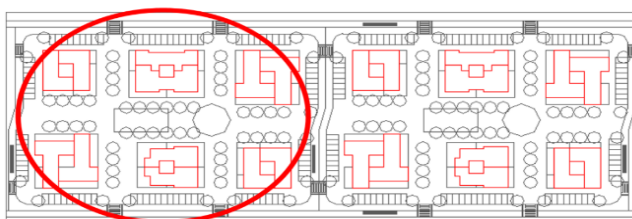
	Forma 8			
Área do Patch (m²)	679,01			
Nº Patch (n≥1)	8,00			
Área de Implantação (m²)	5432,08			
Perímetro do Patch (m)	151,08			
Raio circundante (m)	26,92			
Área de Referência (m²)	24707,52			

Figura 31: Ilustração da Forma 8 e Dimensões da Forma 8



	Forma 9			
Área do Patch (m²)	696,21			
Nº Patch (n≥1)	7,00			
Área de Implantação (m²)	4873,47			
Perímetro do Patch (m)	164,32			
Raio circundante (m)	35,44			
Área de Referência (m²)	24707,52			

Figura 32: Ilustração da Forma 9 e Dimensões da Forma 9



	Forma 10			
Área do Patch (m²)	351,66	438,20	361,96	459,95
Nº Patch (n≥1)	4,00	4,00	2,00	2,00
Área de Implantação (m²)	4803,26			
Perímetro do Patch (m)	75,01	101,00	80,40	92,40
Raio circundante (m)	13,26	15,80	13,50	15,76
Área de Referência (m²)	24707,52			

Figura 33: Ilustração da Forma 10 e Dimensões da Forma 10

Todas as formas selecionadas e acima descritas, foram baseadas no modelo de vizinhança próxima de João Branco Pedro (Pedro, 1999) e nos respectivos parâmetros aplicáveis, na concepção de cada um dos espaços que compõem a vizinhança próxima e respeitando a retícula proposta da Área de Referência (Área = 24 707,52 m²).

4.2 Cálculo dos indicadores de forma

Calcular a forma urbana por intermédio de indicadores permite sistematizar e classificar as análises do domínio da forma urbana, apesar de apresentar algumas debilidades, por não conseguirem traduzir por si todos os aspetos da forma urbana de modo abrangente.

Existem muitos trabalhos desenvolvidos com recurso a indicadores de forma Torrens & Marina (2002), Wassmer (2000), Galster *et al.*(2001), Ewing *et al.* (2015), Tsai (2005) e Longley & Mesev ((2000) distinguiram variedades de análise como a densidade, a compacidade, a dispersão, a expansão entre outros indicadores que permitem relacionar e analisar forma urbana.

Os indicadores que se selecionaram, o índice de compacidade, o índice de porosidade e o índice de complexidade de perímetro pretendem relacionar com seu cariz dimensional, a extrapolação das especificidades das tipologias das 10 formas urbanas selecionadas, numa métrica quantitativa dado pelos três indicadores apresentados.

Índice de Compacidade (CI) – Este índice mede não só a forma do patch individual, mas também o problema da fragmentação da paisagem urbana total. Segundo Li &Yeh (2004) e Huang *et al.* (2007) quanto mais regular a forma do patch maior será o valor de CI e quanto maior for o número de patch menor será o valor de CI, como é possível ilustrar na Figura 34.



Figura 34: Ilustração Índice de “Compacidade”

O índice de “compacidade” (CI) é calculado através da seguinte equação:

$$CI = \frac{\sum \frac{P_i}{p_i}}{n} = \frac{\sum \frac{2\pi \sqrt{\frac{S_i}{\pi}}}{P_i}}{n} \quad (9)$$

Em que:

s_i : área do patch, [m²]

p_i : perímetro da mancha urbana, [m]

P_i : perímetro do círculo com área s_i , [m]

N : número total de manchas urbanas

Índice de Porosidade (ROS) - A "porosidade" ou a permeabilidade mede a proporção de espaço aberto, em comparação com o espaço total da área urbana.

O espaço aberto ou não urbanizável é tanto elementar para os residentes bem como para a sustentabilidade das cidades. Segundo Huang *et al.* (2007) o indicador mede a porosidade da área total destes "vazios" em relação ao total do cálculo da área urbanizada e exemplificado na Figura 35. O Índice de Porosidade varia entre valores compreendidos entre 0 e 100% e aumenta com o aumento de espaços vazios.



Figura 35: Ilustração do Índice de Porosidade

Este indicador de porosidade é também designado de "Rácio de espaço aberto" (ROS) e é calculado segundo a fórmula seguinte:

$$ROS = \frac{s'}{s} \times 100\% \quad (10)$$

s' : somatório da área de todos os "vazios" dentro da área urbana extraída, [m²];

s : somatório da área de todos os patches e de todos os vazios (área total urbana), [m²].

Índice de complexidade de perímetro (fractal) Esta métrica traduz o grau de complexidade do limite das formas urbanas (Figura 15). Segundo Bennien & O'Neill (1994) e Sanches (1997) a complexidade do perímetro de um patch pode ser definida pela sua dimensão fractal. Este índice, dado pela equação (11), descreve a complexidade do perímetro das manchas urbanas através da relação entre o perímetro e a área, sendo a dimensão fractal média dessas manchas urbanas ponderada pela área.

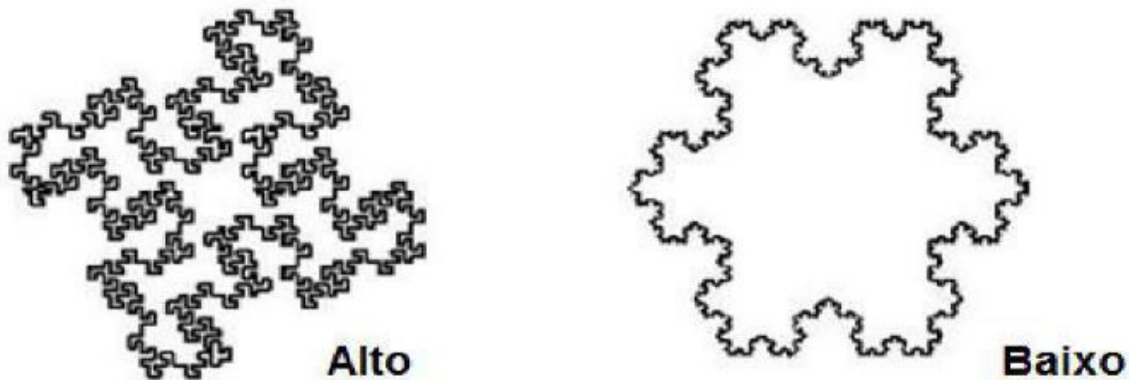


Figura 36: Ilustração do Índice de Complexidade de Perímetro (fractal)

O valor da dimensão fractal varia entre 1 e 2 e os valores mais baixos são adquiridos quanto mais simples a mancha da forma for e a dimensão fractal de um círculo é igual a 1. Por outro lado, se a mancha urbana ou perímetro for mais complexo e irregular a dimensão fractal é maior que 1 (Figura 36).

$$fractal = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{2 \ln \left(\frac{p_i}{2\sqrt{\pi}} \right)}{\ln s_i} \right) \left(\frac{s_i}{\sum_{i=1}^n s_i} \right) \right) \quad (11)$$

Sendo:

p_i = perímetro da mancha i , [m]

a_i = área da mancha i , [m²];

n = número de manchas urbanizadas que compõem a zona urbana, [-].

Calculou-se o Índice de Compacidade (CI), o Índice de Porosidade (ROS) e a Complexidade do Perímetro (fractal) para todas as 10 Formas urbanas propostas e os três indicadores permitiram caracterizar, quantificar e classificar as formas urbanas, do modelo teórico de vizinhança próxima de Pedro (1999) e os seus resultados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 14: Valores dos Indicadores de Forma

Forma Tipo	CI	ROS	Fractal
	[-]	[%]	[-]
1	0,38	74,37	1,25
2	0,49	74,36	1,20
3	0,48	80,38	1,21
4	0,35	76,31	1,28
5	0,62	78,00	1,15
6	0,68	82,53	1,16
7	0,72	80,55	1,14
8	0,61	78,01	1,15
9	0,57	80,28	1,17
10	0,82	80,56	1,07

Atendendo à totalidade das formas, é possível constatar na Tabela 14, que no Índice de Compacidade, a Forma 4 é a que apresenta o valor menor e a Forma 10 apresenta o valor mais alto por esta ser a forma mais compacta, quando comparada com as restantes formas.

Na tabela 14 apresentada verifica-se que a Forma 6 é a que apresenta um Índice de Porosidade maior por conter uma proporção de espaços vazios maior em relação às restantes formas, enquanto a Forma 2 é a que apresenta menos espaços vazios consequentemente apresenta um valor menor de ROS.

Os valores apresentados das 10 formas urbanas no índice da Complexidade de Perímetro (fractal), são relativamente baixos, o que traduz que todas as 10 formas têm um perímetro predominantemente simples e regular sobretudo a Forma 10 que apresenta o valor mais baixo. No entanto, a Forma 4 é a que apresenta um valor maior, tal indicando um perímetro mais complexo e irregular.

O cálculo dos três índices de forma permitiu comparar e relacionar as 10 formas urbanas e retirar algumas conclusões. Como verificar que a Forma 1 apresenta valores baixos para o Índice de Compacidade e para o Índice de Porosidade, atingindo um dos valores mais altos para o indicador da Complexidade do Perímetro. No lado oposto está a Forma 10, que apresenta valores elevados para o Índice de Compacidade e para o Índice de Porosidade, obtendo o valor mais baixo para o indicador de Complexidade do Perímetro.

4.2.1 1º Estudo: o cálculo da propagação do ruído urbano das 10 formas urbanas

O ruído ambiente proveniente do meio urbano, qualquer que seja o local, apresenta variações e quando se pretende caracterizar o ruído produzido pelo tráfego rodoviário, dado o seu ruído ser flutuante, será necessário recorrer ao cálculo duma média, bem como a indicadores que possam revelar os picos máximos e mínimos, ocorridos durante o período de tempo de medição, como se pretende fazer nas tipologias apresentadas.

Para a avaliação dos níveis de ruído nas fachadas, e tendo o método de previsão de ruído Novo Método de Previsão do Ruído do Tráfego (NMPB 96) como base, e sendo este o método (comum de avaliação do ruído) recomendado pela Diretiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de junho de 2002, relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente pela Diretiva 2002/49/EC do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de junho, relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente (Diretiva 2002/49/CE, 2002).

Para a avaliação do ruído nas fachadas calculou-se a propagação da potência acústica que chega a determinada fachada (recetor) tendo em consideração alguns fatores, nomeadamente a atenuação (devida à divergência geométrica; devida à absorção pelo ar; devida à difração; os efeitos devidos ao solo e a absorção das superfícies verticais) (L. Silva, 2009).

Recorreu-se a um modelo de previsão de ruído (NMPB 96) que permitisse incluir diferentes componentes que interferem no cálculo do ruído, desde a emissão até a receção, nomeadamente a configuração do terreno, a configuração das fontes de ruído, a criação de obstáculos como sejam os edifícios que influenciam a emissão do som e a sua propagação.

Para uma avaliação dos níveis de ruído que chegam a determinada fachada são normalmente usados indicadores de ruído, que caracterizam o ambiente acústico exterior.

Para o estudo de caso foi utilizado o nível sonoro contínuo equivalente, ponderado com o filtro A – LeqA, que analisa os vários tipos de ruído durante o mesmo intervalo de tempo de exposição e representa um nível sonoro constante, equivalente aos diferentes tipos de ruído.

Ao longo das fachadas das 10 formas urbanas desenvolveu-se uma grelha quadrangular de cálculo com a dimensão de 1,5 m x 1,5 m e um afastamento à fachada de 0,5 m. As formas urbanas têm todas 4 pisos, com um pé direito de 3m, rés-do-chão inclusive, perfazendo um total de 12m de altura e ilustra-se na Figura 37 a grelha quadrangular de cálculo, usada em todas as 10 formas urbanas.

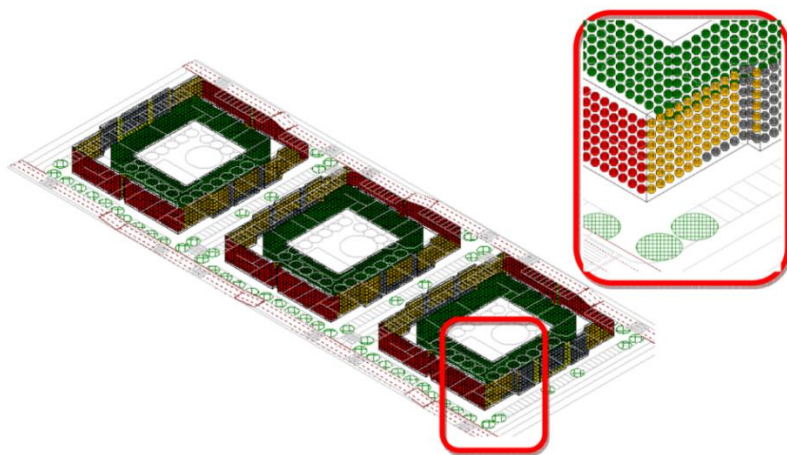


Figura 37: Ilustração da grelha quadrangular de cálculo da Forma 1

De forma a determinar o cálculo e a simulação do ruído nas fachadas e posteriormente obter as médias aritméticas dos níveis de ruído nas dez formas urbanas, considerou-se as seguintes condições de via e de tráfego automóvel:

As vias consideradas, em cada um dos cenários desenvolvidos, segundo o estudo de (M. Oliveira, 2011) foram selecionadas por serem representativas de bairros habitacionais e possuem as seguintes características:

- Pavimento: Asfáltico;
- Inclinação: 0%;
- Fluxo do tráfego rodoviário: Fluído;
- Fluxo de tráfego horário: 300 total de veículos/h, 5% pesados;
- Velocidade de circulação: 50 km/h para os veículos ligeiros e de 40 km/h para os veículos pesados

De modo a ser comparável o nível de ruído nas fachadas dos edifícios, foi apresentado também para cada uma das formas urbanas os nós de cálculo da grelha e estes resumem-se na Tabela 15 que se segue.

Tabela 15: Níveis de ruído nas fachadas dos edifícios

Formas Urbanas	Leq (A)	Lmax	Lmin	Nº de nós de cálculo
Forma 1	50,67	64,33	35,90	6216
Forma 2	50,27	64,80	35,58	6909
Forma 3	52,90	64,22	38,02	5439
Forma 4	52,70	68,83	35,93	6489
Forma 5	54,79	63,77	44,17	6272
Forma 6	54,72	63,08	41,08	5474
Forma 7	55,94	64,85	44,35	5866
Forma 8	51,70	63,15	35,80	6273
Forma 9	57,14	64,07	48,90	5411
Forma 10	56,68	64,04	44,99	5250

Numa análise superficial dos níveis de ruído nas dez formas urbanas podemos constatar que a forma urbana 9 é a que detêm um nível de ruído mais elevado. Por sua vez, as formas urbanas 1e 2 são as que detêm um valor inferior.

4.2.2 2º Estudo: o cálculo da radiação solar incidente nas 10 formas urbanas

De modo análogo, e utilizando os mesmos modelos e indicadores de forma urbana já testados e que serviram de base ao estudo de Oliveira (2011), Coutinho (2018) estudou a relação entre as formas urbanas e seus indicadores, e analisando a radiação solar que chega aos edifícios. Ambos os estudos visam analisar diferentes cenários de layout da tipologia urbana numa lógica de otimização e de apoio à decisão em fase preliminar de projeto.

Para o estudo da radiação solar incidente nas formas urbanas, Coutinho (2018) utilizou o software Análise Solar para Revit (SAR) que calcula a quantidade de radiação solar (radiação direta (I_b), radiação difusa (I_d), radiação refletida do solo (I_r)) que chega a uma dada superfície (fachada e cobertura) durante um determinado período de tempo. O cálculo utilizado pelo software inclui o sombreamento dos objetos circundantes ($F_{\text{sombreamento}}$), a porção do céu "visível" da superfície terrestre ($F_{\text{céu}}$) e o ângulo de incidência entre o sol e a face a ser analisada (θ) (ver Equação (4)).

O estudo apresentado e elaborado por Coutinho (2018) considerou que nas condições nominais não se definiam materiais tanto para os edifícios como para os elementos exteriores circundantes. Nesse sentido, a equação básica não leva em conta a radiação refletida, por não existir informação espectral sobre a simulação das superfícies exteriores.

Desse modo, a equação considera apenas a radiação difusa (que depende apenas da porção de céu visível da superfície terrestre) e a radiação incidente direta (que apenas depende do sombreamento dos outros edifícios e do ângulo de incidência entre o sol e a face do edifício que está em estudo).

Período temporal considerado

Os valores médios considerados são as médias dos valores máximos e mínimos diários observados da temperatura. O software CLIMAS-SCE, disponibilizado pelo LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia) e que foi desenvolvido especificamente para o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios para obter as estatísticas climatológicas e o Ano Meteorológico de Referência do local desejado para executar simulações dinâmicas de sistemas e edifícios. Os dados exportados pelo software são corrigidos com a altitude do lugar.

Na estação de arrefecimento (Verão) foi adotado o período temporal previsto no Regulamento dos Edifícios de Habitação (REH), que corresponde ao compreendido entre os meses de junho a setembro. Os parâmetros climáticos pertinentes para caracterizar a estação de arrefecimento são as seguintes:

- o L_v -Duração da estação = 4 meses = 2928 horas;

- o $\theta_{ext,v}$ -Temperatura exterior média [$^{\circ}\text{C}$];

- o I_{sol} -Energia solar acumulada durante a estação, recebida na horizontal (inclinação 0°) e em superfícies verticais (inclinação $\lambda 0^{\circ}$), para os quatro pontos cardeais e os quatro colaterais [kWh/m^2].

Quanto ao período de aquecimento, foi igualmente tido em consideração o estipulado no REH: “A estação de aquecimento tem início no primeiro decêndio posterior a 1 de outubro em que a temperatura média diária é inferior a 15°C e tem termo no último decêndio anterior a 31 de maio em que a referida temperatura ainda é inferior a 15°C ”.

Coutinho (2018) considerou no seu estudo, a radiação solar por unidade de área, para que haja comparabilidade, utilizou assim para o efeito a seguinte expressão:

$$\text{Radiação solar /m}^2 = \text{Radiação total} / \text{Área de fachada} \quad (12)$$

E não considerou radiação solar nas coberturas nos dois períodos calculados, por as 10 formas urbanas apresentarem valores constantes.

A Análise da radiação solar por unidade de área para a totalidade das 10 formas elaborado por Coutinho (2018) pretendia criar seis correlações entre os indicadores de forma urbana (índice de compacidade, índice de porosidade e índice de complexidade fractal) e a incidência da radiação solar nas 10 formas urbanas selecionadas para os dois períodos temporais definidos (período de arrefecimento e período de aquecimento).

Coutinho (2018) recorrendo a um processo análogo a Oliveira (2011) utilizou uma regressão linear simples, procurando assim descrever, por intermédio da equação de uma reta, a correlação entre duas variáveis: o indicador de forma urbana (variável independente) e a radiação solar por unidade de área (variável dependente).

O modelo de regressão é ajustado pelo método dos mínimos quadrados, no sentido de ser determinada qual a reta que melhor se ajusta aos pares de valores que constituem o diagrama de dispersão. O coeficiente de determinação R^2 quantifica a qualidade da correlação entre as variáveis.

4.2.2.1 Processo de Clustering

Coutinho (2018) no seu estudo teve a necessidade de recorrer a um processo de *clustering* na seleção final das formas e assentou num conjunto de pressupostos:

- o Incluir no cluster unicamente formas que garantam alguma uniformidade de exposição solar (nomeadamente por orientação), particularmente em situação de inverno, quando o efeito de sombreamento entre os corpos que constituem uma dada forma é mais significativo (como a Forma 4 e a 9).

- o Excluir do cluster formas com padrões de baixa uniformidade (formas urbanas irregulares, com grande heterogeneidade, como o caso da Forma 7).

o Excluir do cluster formas onde não possa ser identificado um padrão de simetria, ou, em alternativa, um padrão de repetição perfeito do módulo base (como a Forma 3).

Este procedimento, segundo Coutinho (2018) levou à exclusão de 4 formas, por não conformidade com os pressupostos acima definidos e por revelarem incongruências quando comparadas com a totalidade do universo das formas.

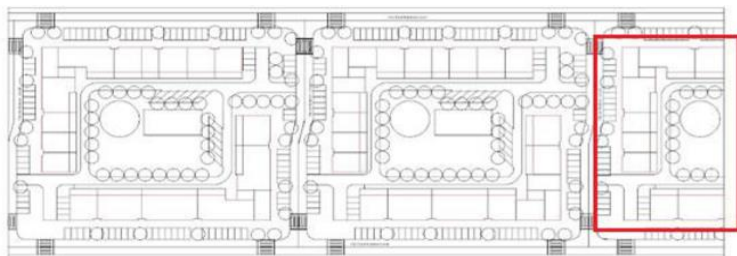


Figura 38: Análise da Forma 3

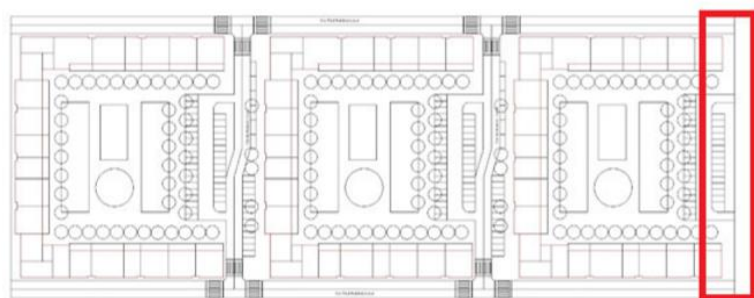


Figura 39: Análise da Forma 4

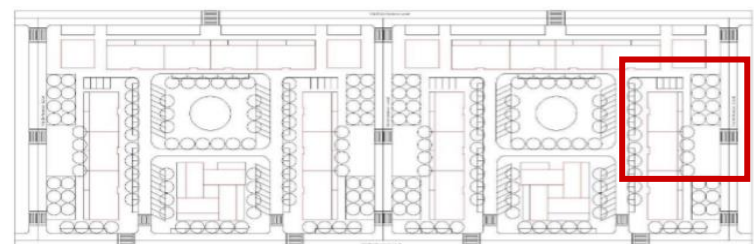


Figura 40: Análise da Forma 7

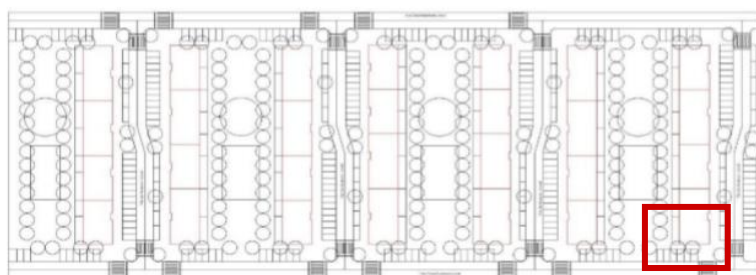


Figura 41: Análise da Forma 9

Seleção do período temporal

Coutinho (2018) tomou a opção de restringir a análise à estação de aquecimento, por se considerar comparativamente pouco expressivo o consumo energético no verão. Considerando que altura solar no verão atenua fortemente o sombreamento das fachadas, mas no inverno é muito significativo o efeito de sombreamento dado que a altura solar anda mais baixa e encontrar mais obstáculos na incidência da radiação solar provocando assim mais sombreamento nas fachadas.

4.2.3 Análise da Relação entre Forma Urbana, Radiação Solar e Ruído urbano

O *clustering* e os respetivos critérios foram apresentados anteriormente e selecionaram para análise as formas urbanas 1, 2, 5, 6, 8 e 10, cingindo a estas a relação entre os valores de radiação solar incidente nas fachadas por unidade de área e os indicadores selecionados para caracterização dessas 6 formas urbanas.

Os 3 indicadores de forma urbana selecionados (Índice de Compacidade, Índice de Porosidade e Índice de Complexidade Fractal), para o período temporal correspondente à estação de aquecimento, compreendido entre 11 de outubro e 8 de maio, com uma duração de 210 dias. Estes índices vão permitir caracterizar e entender de que modo a forma urbana, calculada por indicadores específicos, poderá influenciar os ganhos por radiação solar na envolvente dos edifícios.

De modo análogo colocou-se na mesma tabela (Tabela 16) os valores dos níveis de exposição ao ruído de modo a entender a interação das formas urbanas e o ruído urbano. Essa interação foi monitorizada por indicadores urbanos, comparando os efeitos da propagação de ruído, nas formas urbanas tipo. A modelação do ruído, permitiu quantificar o nível de ruído nas fachadas e calcular os níveis de ruído associado a cada uma das 6 Formas selecionadas. Determinaram-se as médias aritméticas dos níveis de ruído para as fachadas das 6 formas urbanas selecionadas, recorrendo à grelha de nós de cálculo criada para o efeito e referida anteriormente. Para cada um dos indicadores de forma criou-se uma tabela com os valores de cada uma das 6 formas urbanas e o respetivo valor da exposição ao ruído e à incidência da radiação solar. De seguida é apresentado um gráfico com diagrama de dispersão, reta de regressão e coeficiente de determinação R^2 com a correlação entre as três variáveis, com o objetivo de determinar a influência de cada uma das variáveis na forma urbana.

4.2.3.1 Índice de Compacidade, radiação solar e níveis de ruído

Como é possível observar no gráfico (Figura 42) há uma tendência de aumento da radiação solar com o aumento do índice de compacidade. Sabendo-se que quanto maior o valor deste índice, mais regular e compacta será a forma, será igualmente expectável nestas circunstâncias uma menor introdução de sombreamento nas fachadas e consequentemente maiores ganhos por radiação solar, o que vai de encontro à tendência observada.

Tabela 16: Índice de Compacidade e radiação solar por forma seleccionada no período de aquecimento e níveis de ruído exposto

Forma tipo	Índice Compacidade (CI)	Níveis de Ruído (Média Aritmética dB(A) 300 veic/h) Betuminoso normal	Radiação solar (por forma seleccionada no período de aquecimento (kW.h) Total fachadas)
1	0,38	50,67	262,94
2	0,49	50,27	258,37
8	0,61	51,70	266,42
5	0,62	54,79	265,93
6	0,68	54,72	270,09
10	0,82	56,68	275,97

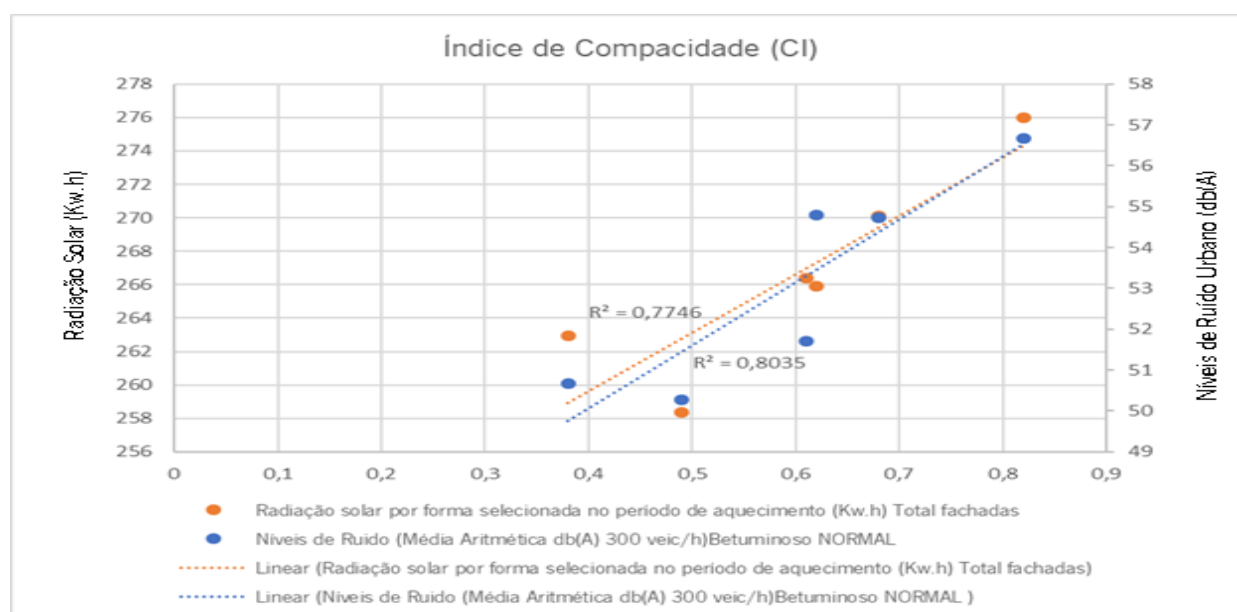


Figura 42: Gráfico Relacional do Índice de Compacidade com os Níveis de Ruído e com a Radiação solar no período de aquecimento para as formas seleccionadas

Como se pode observar no gráfico da Figura 42, o que influencia o CI é a regularidade da forma e apesar da regularidade nas 6 Formas ser diferente, a linha de tendência denota uma tendência para o aumento do ruído à medida que a regularidade aumenta. O Índice de Compacidade (CI) apresenta o valor mínimo para a Forma1, mas o valor máximo já é atribuído à Forma 10, sendo este o mais regular. Pois quanto maior a regularidade das formas urbanas, menor é a possibilidade de se formarem zonas de sombra, isto é, zonas protegidas à exposição do ruído. Assim sendo e como seria expectável o ruído aumenta à medida que a regularidade das formas também aumenta.

4.2.3.2 Índice de Porosidade, radiação solar e níveis de ruído

Como se pode observar na Tabela 17 e no gráfico da Figura 44, há uma tendência de aumento da radiação solar com o aumento do Índice de Porosidade. O valor deste indicador de forma aumenta consoante o número de espaços abertos, isto é quanto mais espaços abertos menor o número de obstáculos, consequentemente menor as áreas de sombreamento, que influenciam no aumento da exposição à radiação solar. Nestas circunstâncias, era expectável que os índices mais altos correspondam a formas urbanas com maiores ganhos por radiação solar.

Tabela 17: Índice de Porosidade e radiação solar por forma seleccionada no período de aquecimento e níveis de ruído exposto

Forma tipo	Índice de Porosidade (ROS)	Níveis de Ruído (Média Aritmética db(A) 300 veic/h) Betuminoso normal	Radiação solar (por forma seleccionada no período de aquecimento (kW.h) Total fachadas)
2	74,36	50,27	258,37
1	74,37	50,67	262,94
5	78,00	54,79	265,93
8	78,01	51,70	266,42
10	80,56	56,68	275,97
6	82,53	54,72	270,09

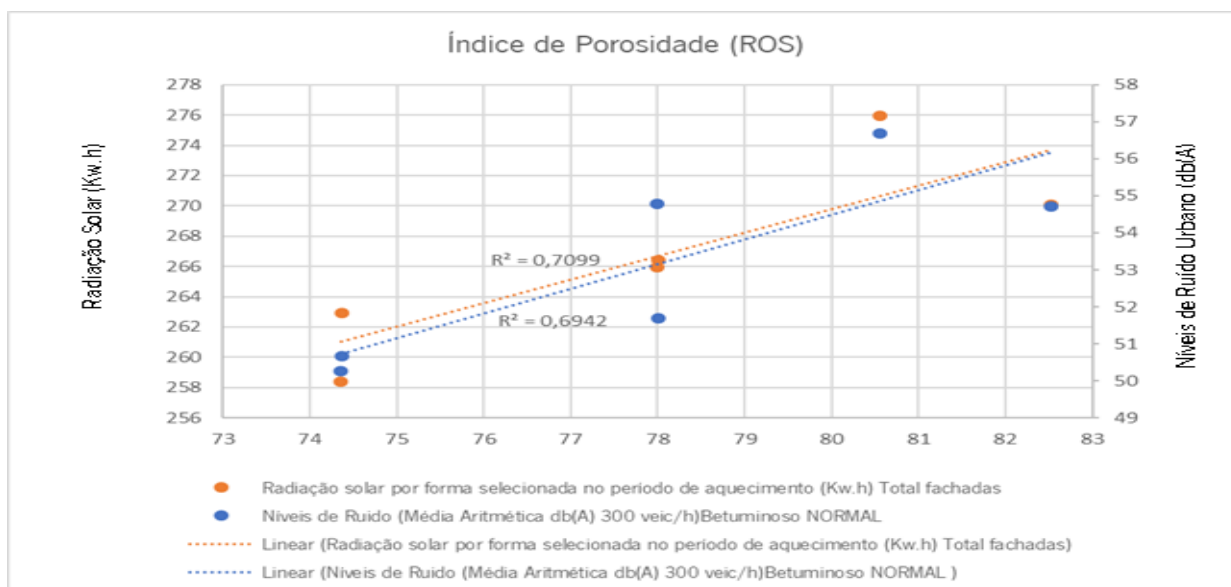


Figura 43: Gráfico Relacional do Índice de Porosidade com os Níveis de Ruído e com a Radiação solar no período de aquecimento para as formas seleccionadas

O índice de porosidade (ROS), mede a relação do espaço não edificado com a Área de Referência, onde a Forma 6 é a que apresenta mais espaços vazios, a relação com o ruído é diretamente proporcional, isto é, à medida que se aumenta o ROS aumentam os respetivos níveis de ruído. Isto explica-se pelo facto de quanto maior é a permeabilidade da forma urbana, mais facilmente as ondas sonoras conseguem atingir os edifícios, no seu interior. Em relação às restantes formas, a Forma 1 e a Forma 2 são as que tem um maior aproveitamento da Área de Referência, logo um menor valor de ROS.

4.2.3.3 Índice de Complexidade de Perímetro, radiação solar e níveis de ruído

De acordo com a Tabela 18 e o gráfico da Figura 44 são apresentados valores que ao contrário das correlações estabelecidas para os anteriores índices de forma, é possível observar uma tendência de diminuição da radiação solar com o aumento da Complexidade do Perímetro (Fractal). Este resultado era expetável considerando que índice Fractal aumenta com a complexidade da forma (saliências, concavidades, convexidades, irregularidades) produzindo áreas de sombreamento nas fachadas, e consequentemente menores ganhos por radiação solar, o que vai de encontro à tendência observada.

Tabela 18: Índice de Complexo de Perímetro e radiação solar por forma selecionada no período de aquecimento e níveis de ruído exposto

Forma tipo	Índice de Complexidade de Perímetro (Fractal)	Níveis de Ruído (Média Aritmética db(A) 300 veic/h) Betuminoso normal	Radiação solar (por forma selecionada no período de aquecimento (Kw.h) Total fachadas)
10	1,07	56,68	275,97
5	1,15	54,79	265,93
8	1,15	51,70	266,42
6	1,16	54,72	270,09
2	1,20	50,27	258,37
1	1,25	50,67	262,94

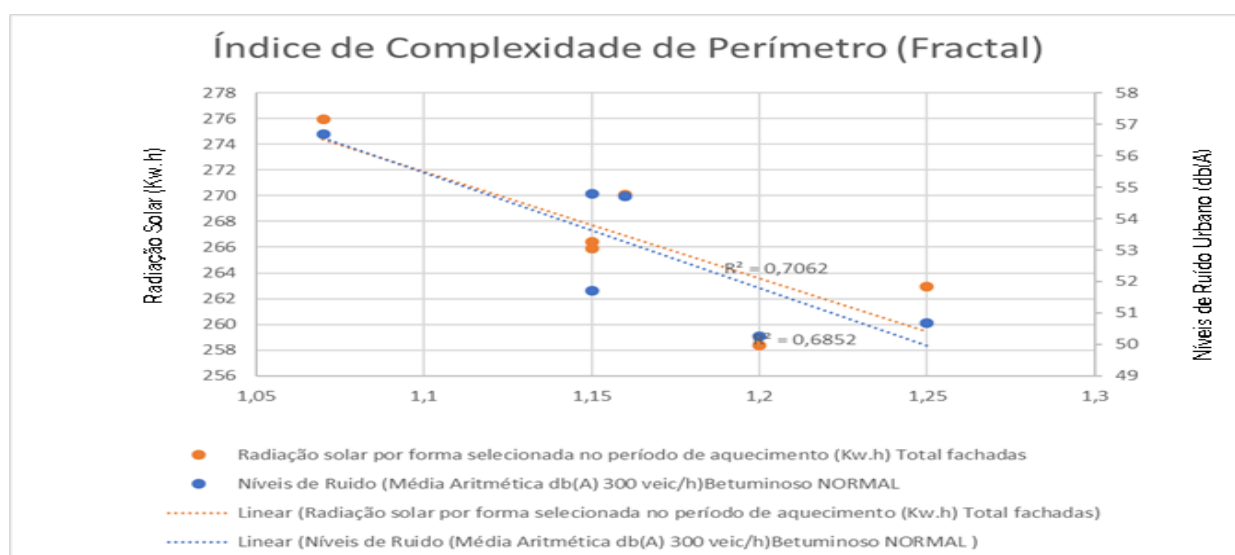


Figura 44: Gráfico Relacional do Complexidade de Perímetro com os Níveis de Ruído e com a Radiação solar no período de aquecimento para as formas selecionada

O Índice de Complexidade do Perímetro ou Fractal, como referido, mede a regularidade e a complexidade das formas, onde a Forma 4 é a que apresenta o maior valor e a Forma 10 o menor valor. À medida que o nível de ruído aumenta o valor de fractal diminui, isto é quanto mais complexas forem as formas mais espaços sombra são criados, logo a permeabilidade e a exposição ao ruído é menor.

4.2.4 Análise da correlação dos 3 indicadores de forma com a exposição ao ruído e à radiação solar

Os resultados observados vão de encontro ao expectável e as três análises de correlação permitiram concluir que a radiação solar bem como a exposição ao ruído são influenciados pelo formato e volumetria da forma e da envolvente do edificado. Nomeadamente pela sua compacidade, pela área dos espaços abertos, ou pela simplicidade da forma da sua mancha urbana.

A radiação solar, para além dos fatores já referenciados é influenciada pelo sombreamento e os indicadores de forma retratam o impacto dessa variabilidade, isto é, um aumento ou redução das áreas de sombreamento alteram os ganhos solares que chegam à fachada e que as formas urbanas analisadas no estudo preliminar retratam essa variabilidade.

Em particular, na estação de aquecimento (inverno), o efeito do sombreamento é muito significativo num determinado cenário dado pela baixa altura do sol da estação do ano. Nesse sentido, foi expectável que as formas urbanas com um formato e volumetria mais linear sejam mais propícias a uma transmissão/captação de radiação solar sem obstáculos (de baixo sombreamento na envolvente, particularmente a vertical, dos edifícios), permitindo uma amplitude de exposição de fachada favorável a um aumento de exposição à radiação solar.

As formas urbanas com formatos e volumetria mais complexas, com concavidades e reentrâncias ou pátios interiores geram entre si efeitos de sombreamento nas fachadas confrontantes, proporcionando normalmente uma redução da exposição à radiação solar como já referido.

Nesta avaliação preliminar, a Forma 10 é a que apresenta valores de radiação incidente mais elevados por ser uma forma urbana simples, consequentemente apresenta valores de Compacidade e Porosidade igualmente elevados e um valor baixo de Fractal. As Formas 1 e 2 por serem menos compactas e porosas apresentam baixos valores de radiação incidente, e valores de fractal elevado por serem formas complexas têm um comportamento de tendência inversa ao da Forma 10.

No entanto, em termos de exposição ao ruído, é benéfico que as formas urbanas terem formatos e volumetrias complexas e de preferência com pátios interiores, como a Forma 1, de forma a criarem zonas de sombreamento acústico, isto é, zonas de redução de exposição ao ruído.

Na mesma linha de pensamento, o sombreamento acústico que as formas urbanas promovem, influenciam os níveis de exposição de ruído que chega às fachadas. Deste modo, será previsível atestar que as Formas 1 e 2 são as que detêm um menor valor de exposição ao ruído e a Forma 10 a que está mais exposta ao ruído, por não deter áreas de sombreamento acústico.

4.3 Conclusões a partir da análise preliminar

4.3.1 Os pressupostos e condicionantes do estudo preliminar

A presente abordagem preliminar teve como objetivo estudar a influência da forma urbana quer nos ganhos por radiação solar na envolvente vertical do edificado, quer na exposição de ruído que chega às fachadas das formas urbanas selecionadas.

As formas urbanas estudadas foram selecionadas do modelo de vizinhança próxima de Pedro (1999) e a seleção e a estruturação aplicados por Oliveira (2011) no estudo da exposição ao ruído e por Coutinho (2018) no seu estudo sobre ganhos por radiação solar.

As formas selecionadas e já apresentadas, para o estudo preliminar respeitam uma reticula proposta de área de referência ($24.707,52\text{m}^2$), em que cada forma urbana é preenchida pela repetição da sua forma padrão. Foi atribuído a cada forma uma designação nominal numérica e apresentados os dados referentes à geometria de cada uma, numa tabela, de modo a ser comparável e de fácil leitura.

De forma a sistematizar a análise das formas urbanas selecionadas do modelo de Pedro (1999), Oliveira (2011) e Coutinho (2018) adotaram uma altura constante de 4 pisos, com um pé direito de 3m, rés-do-chão inclusive, perfazendo um total de 12m de altura. Estas premissas foram adotadas em ambos estudos possibilitando no primeiro o estabelecimento de relações entre os níveis de exposição ao ruído e os indicadores de forma urbana ensaiados e no segundo o estabelecimento de relações entre a energia solar incidente nas fachadas e os mesmos indicadores de forma das formas ensaiadas.

Coutinho (2018) excluiu quatro formas do estudo não considerando as irregularidades e as assimetrias observáveis no universo total das formas estudadas, garantindo assim alguma uniformidade de exposição solar (nomeadamente por orientação), padrões de simetria ou de repetição perfeitos e uma homogeneidade perceptível de padrões.

A metodologia desenvolvida por Coutinho (2018), teve o intuito de demonstrar como a forma urbana influencia as necessidades energéticas de um edifício. Como os ganhos solares na sua envolvente vertical, dependendo do tipo de forma urbana empregue, podem proporcionar uma redução do seu consumo energético.

Esta abordagem preliminar, avaliou-se, através do cálculo dos indicadores de forma urbana, a correlação da forma urbana com os níveis de exposição solar das fachadas e com os níveis de ruído que chegam à fachada.

No primeiro estudo, Oliveira (2008) recorreu ao software CadnaA – Computer Aided Noise Abatement, para calcular os níveis de ruído nas fachadas, que utiliza o método de previsão de ruído NMPB 96. Recorrendo a este software desenvolveu o cálculo segundo uma grelha quadrangular, ao longo de todas as fachadas com uma dimensão de 1,5 m x 1,5 m e um afastamento à fachada de 0,5 m.

No segundo estudo, Coutinho (2017) recorreu ao software de modelação Revit Solar Analysis, cujo cálculo foram considerados dois períodos, o de aquecimento (inverno) e o de arrefecimento (verão). Foi concluído neste estudo, que para a estação de verão não foi possível estabelecer uma correlação aceitável, ao contrário do verificado em estação de aquecimento. Assim, restringiu a análise à estação de inverno.

4.3.2 Algumas conclusões do estudo preliminar e premissas para o estudo de caso

Nesta abordagem preliminar, a combinação dos dois estudos, a partir do mesmo modelo de formas urbanas permitiu a relação dos resultados obtidos em cada um dos estudos, com os indicadores de forma, estabelecer algumas conclusões.

Nomeadamente, que a forma urbana 10 é a que proporciona um maior ganho energético no período de inverno e que as formas 1 e 2 são as que proporcionam um menor ganho energético no mesmo período.

Como já referido este facto explica-se pela relação direta entre a compacidade e a quantidade de espaços abertos da forma urbana. Quanto maior a compacidade, maior a entrada da radiação solar. Por sua vez, a menor complexidade das formas leva a uma menor formação de sombras solares, conduzindo a um maior ganho energético. A Forma 10, com o valor de índice fractal mais baixo, corrobora esta dedução.

Pelo contrário, as Formas 1 e 2, com os Índices de Compacidade e Porosidade mais baixos e complexidade do perímetro mais elevada, são as que possuem ganhos solares mais reduzidos. É possível concluir que há um aumento dos ganhos energéticos por radiação solar à medida que o Índice de Porosidade e de Compacidade aumenta. Inversamente à medida que o Índice Fractal aumenta há uma redução dos ganhos energéticos por radiação solar.

Por outro lado, em termos de redução de exposição ao ruído o processo é inverso ao da incidência por radiação solar; isto é, à medida que os Índices de Compacidade e Porosidade aumentam há também um aumento da exposição ao ruído, que neste caso não é benéfico. Neste sentido, pretende-se que os níveis de exposição ao ruído sejam reduzidos e não elevados. Por sua vez o Índice Fractal é o que representa a tendência pretendida, isto é, à medida que a complexidade de forma urbana aumenta os níveis de exposição ao ruído reduzem.

O estudo preliminar desenvolvido revelou-se útil e adequado, permitindo demonstrar a relação combinada da influência da forma urbana nos ganhos solares na envolvente vertical dos edifícios, ou como se comporta perante a exposição ao ruído.

Esta abordagem preliminar teve como objetivo averiguar quais as formas urbanas que se comportam melhor e pior face à exposição ao ruído e face à incidência da radiação solar, permitindo comparar e relacionar as formas urbanas com a radiação solar e o ruído urbano.

As considerações apresentadas evidenciam a potencialidade destes índices como ferramenta de apoio ao planeamento no domínio da exposição solar e exposição ao ruído no estudo e na regulamentação de novas construções.

4.3.3 Limitações

O presente estudo apresenta algumas limitações não menosprezáveis, a abrangência é um ponto limitativo, na medida em que, não tendo a pretensão de ser um manual de soluções tipo, não é possível contemplar todas as tipologias e respetivas variantes e conflitos.

Por se considerar que não existem tipologias universais e transponíveis também não existem soluções ideais aplicáveis a qualquer caso específico, mas pode-se incentivar no modo como estas correlações podem ser introduzidas, desde logo na fase de conceção.

No decorrer desta abordagem preliminar e no estudo dos trabalhos de Oliveira (2011) e Coutinho (2017), verificaram-se algumas limitações diretamente associadas aos indicadores de forma urbana para além da própria abrangência dos modelos de formas selecionados.

Os indicadores (CI, ROS e Fractal) que foram utilizados nos dois estudos são normalmente aplicados em áreas urbanas extensas e não para quarteirões ou para as formas do modelo de vizinhança próxima adotado. Nas formas urbanas usadas contornou-se esse facto usando a mesma altura nas diferentes formas urbanas.

No plano de trabalho proposto a seguir pretende-se dar resposta a algumas dessas limitações, pormenorizando o estudo e a seleção de uma a três formas urbanas de modo a alcançar um nível de detalhe do estudo pretendido.

A Forma 10 e a Forma 1 são as candidatas a serem escolhidas nesta fase por serem representativas das situações ideais e não ideais para cada um dos estudos e sendo eles inversamente relacionados, isto é, a Forma 10 é a forma urbana que melhor apresenta a situação ideal para obter maior incidência de radiação solar nas fachadas, por apresentar uma volumetria simples, linear e compacta.

As mesmas características da Forma 10 que potenciam a incidência solar, são as mesmas que promovem a situação mais desfavorável perante a exposição ao ruído, por não apresentarem reentrâncias ou complexidade volumica que geram zonas de proteção ao ruído (áreas de sombreamento acústico) que por sua vez diminuem os níveis de exposição.

De forma a dar resposta a estas *“incompatibilidades”* torna-se pertinente estudar essas zonas de conflito, a partir dos parâmetros e requisitos que são levados em consideração no cálculo dos níveis de exposição solar e sonora.

Considerando as conclusões apresentadas pelo estudo preliminar, foi possível escolher o estudo de caso proposto neste âmbito. Nomeadamente um quarteirão que contemple uma forma urbana com um pátio interior, similar à Forma urbana 1 e 2 e um edifício na mesma envolvente que represente a Forma urbana 10, que melhor representem a situação de compromisso entre as necessidades solares e as sonoras.

5. ESTUDO DE CASO

5.1 Enquadramento do caso de estudo

A escolha do estudo de caso nomeadamente um quarteirão, teve como principal requisito ter um edificado com um pátio interior, o mais fechado possível e uma outra edificação com pátio semifechado representativo das formas urbanas 1 e 2 do estudo preliminar e, por último, uma envolvente que se assemelhe à forma urbana tipo 10, de modo a ser possível concretizar uma análise prática do estudo preliminar e averiguar a situação de compromisso entre as necessidades solares e as sonoras.

Ao analisar o território português, centrou-se a procura do estudo de caso nos distritos de Braga, Porto e Viana do Castelo, pela questão de proximidade à Universidade Minho, de forma a poder ser monitorizado mais vezes. O quarteirão de Viana do Castelo encontrado, corresponde às premissas propostas e o seu acesso é de âmbito livre, não tendo que recorrer a permissões de condomínios ou moradores para efetuar medições no local, para além de ser um edificado do Atelier 15 como gabinete premiado pela qualidade de seus projetos.

5.1.1 Enquadramento geográfico

O estudo realizado teve como objetivo medir *in situ* com diferentes equipamentos e verificar a influência da radiação e do ruído num quarteirão do município português de Viana do Castelo, localizado no litoral noroeste e na NUT III Alto Minho. Trata-se de um concelho de média dimensão, com uma população de 85.784 habitantes e uma área total de 319,02 km². A Figura 45 ilustra a área de estudo retratado do município em 2017 (Instituto Nacional de Estatística (INE), 2021b).



Figura 45: Área de estudo de caso na Rua D. Maria II (Viana do Castelo). (A) Contexto europeu; (B) NUTS III Alto Minho e Concelho de Viana do Castelo; e (C) Localização da área de estudo

O estudo de caso consiste num edifício residencial multifamiliar, cujo contexto urbano é um aglomerado no centro histórico com ruas estreitas e edifícios com uma altura média de 3 pisos. Os quadrantes nascente, poente e norte estão consolidados com construções pré-existentes, enquanto o quadrante sul é mais aberto com a presença de edifícios notáveis como uma capela. O edifício tem uma configuração de bloco fechado com pátios interiores, como se pode ver na Figura 45.

Para o estudo de radiação solar, foi utilizado o modelo ASHRAE Revised Clear Sky Model (“Tau Model”) e a respetiva calibração do modelo desenvolvido, foram selecionados 4 pontos de medição (Figura 46), em cada ponto de recolha de dados foram utilizados 3 equipamentos (descritos no subcapítulo das ferramentas de medição solar) para medir a radiação solar global.

Para o estudo de ruído na fachada foi utilizado o modelo previsional CNOSSOS e a respetiva calibração do modelo recorreu à medição do nível de ruído em 9 pontos (Figura.46). Os equipamentos selecionados estão certificados pelo IPQ e estão de acordo com a norma ISO1996:2021 e foram escolhidos por razões de mobilidade, acesso e custo-benefício de utilização (equipamentos fornecidos pelos laboratórios da instituição que acolheu o estudo).



Figura 46: Vista da área do quarteirão escolhido como estudo de caso e as respetivas marcações dos pontos de recolha de dados (PC) para a radiação solar 4 (PC) (a) e para o ruído 9 (PC)(b)

Como as condicionantes e características da envolvente influenciam a exposição do ruído e a exposição solar que chegam às fachadas do estudo de caso, considerou-se pertinente registar fotograficamente esse contexto na Tabela 19.

Tabela 19: Representação fotográfica do local de estudo e da sua envolvente e do equipamento de medição

Fotografias do local de estudo (envolvente e equipamento de medição)	Vegetação da envolvente	Vias de tráfego da envolvente
 PC1 com orientação solar Noroeste	10 árvores de folha caduca com 1 tronco de $\pm 0,30$ cm de diâmetro e 4,00 m de altura. Folhagem quando presente ± 8 m de diâmetro	Estrada principal com tráfego mais intenso à esquerda e estrada secundária em frente do equipamento de medição
 PC2 com orientação solar Sul com obstáculo	3 árvores de folha caduca com 1 tronco de $\pm 0,30$ cm de diâmetro e 2,70-3,00 m de altura. A folhagem, quando presente, tem um diâmetro de ± 7 m	Faixa de rodagem principal com tráfego mais intenso à esquerda e faixa de rodagem secundária em frente do aparelho de medição
 PC3 com orientação solar leste	Não há vegetação à volta da estação de medição.	Estrada secundária com menos tráfego automóvel à esquerda e à direita reservada aos peões
 PC4 com orientação solar Sul sem obstáculo	9 árvores de folha perene, neste caso com um tronco com vegetação de ± 1 m de diâmetro e 6-7,00 m de altura.	Estrada principal com tráfego automóvel mais intenso à direita e estrada secundária com menos tráfego em frente do equipamento de medição

5.1.2 Enquadramento climático

Em Portugal o zonamento climático foi estabelecido através do Despacho n.º 15793-F/2013, de 13 de dezembro de 2013. Neste diploma existe a diferenciação entre zonas climáticas de inverno (I1, I2 e I3) e zonas climáticas de verão (V1, V2 e V3). As zonas climáticas de inverno foram definidas a partir do número de graus-dias na estação de aquecimento, enquanto as zonas climáticas de verão foram diferenciadas através da temperatura média exterior na estação de arrefecimento (Figura 47).

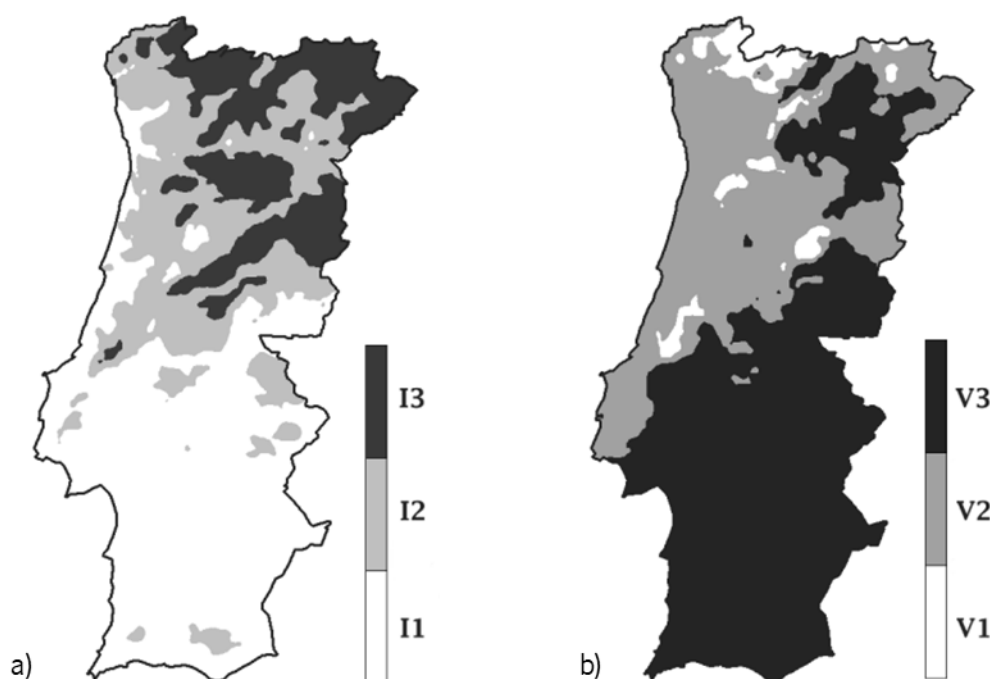


Figura 47: Representação das zonas climáticas de inverno (a) e de verão (b) em Portugal continental (Fonte: (Diário da República, 2.a série — N.º 234 — 3 de dezembro de 2013 Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013, 2013)

No caso de Viana de Castelo, nomeadamente a localização do estudo de caso a situação de Inverno é uma zona climática I1 (1237 GD – I1) e para a situação de Verão é uma zona climática V2 (21,5 °C).

Viana do Castelo possui um clima mediterrânico do tipo Csb ("climas de verão fresco"), ou seja, com verões amenos. Dias com mais de 30 °C ocorrem com relativa raridade, cerca de 20 por ano em média, e os verões são relativamente secos, mas dos mais chuvosos de Portugal continental. Os invernos são amenos e muito chuvosos, sendo que dias abaixo de 0 °C ocorrem com raridade, cerca de 10 por ano (Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2020).

O clima mediterrânico ou clima de verão seco é um tipo de clima caracterizado por invernos chuvosos e verões secos. O nome desse tipo climático é oriundo da Bacia do Mediterrâneo. Esses climas estão geralmente localizados nas costas ocidentais dos continentes, entre 30 e 50 graus de latitude norte e entre 30 e 40 graus de latitude sul da linha do Equador, tipicamente entre os climas oceânicos em direção aos polos, onde tendem a ser mais húmidos, e entre climas semiáridos frios e áridos em direção a linha do Equador, onde tendem a ser mais secos e mais quentes (Figura 48).

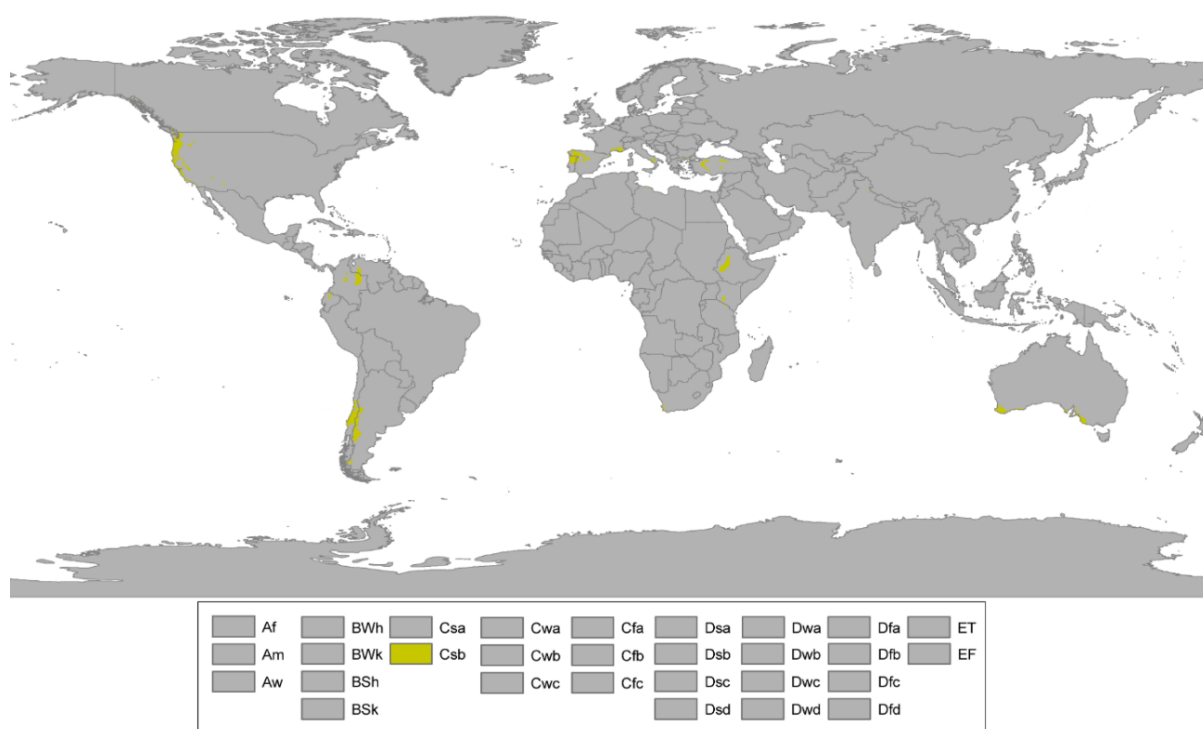


Figura 48: Representação das zonas de clima mediterrânico do tipo Csb (Fonte: (IPMA (Instituto Português do Mar e do Atmosfera, 2023))

Sob a classificação climática de Köppen-Geiger, os "climas de verão quente e seco" (classificados como Csa) e os "climas de verão fresco" (classificados como Csb) são frequentemente referidos como "Mediterrânicos". Sob o sistema climático de Köppen, a primeira letra indica o grupo climático (neste caso climas temperados). Os climas temperados ou zonas "C" têm uma temperatura média acima de 0 °C (ou -3 °C), mas abaixo de 18 °C, nos meses mais frios. A segunda letra indica o padrão de precipitação "s" (que representa verões secos). Köppen definiu como um mês de verão seco aquele com menos de 30 mm de precipitação e com menos de um terço da precipitação do mês mais húmido do inverno.

Algumas classificações, no entanto, usam um nível de 40 mm (Kottek *et al.*, 2006; Peel *et al.*, 2007). A terceira letra indica o grau de calor no verão: "a", que representa uma temperatura média do mês mais quente acima de 22 °C, enquanto "b" indica a temperatura média do mês mais quente abaixo de 22 °C.

Ocasionalmente chamado de “clima mediterrânico de verão morno”, esse subtipo do clima mediterrâneo é classificado como (Csb) é a forma menos comum do clima mediterrâneo. As correntes oceânicas frias e a ressurgência costumam ser a razão para esse tipo de clima mediterrâneo ser mais frio.

Como dito anteriormente, regiões com este subtipo de clima mediterrânico experimentam verões mornos (mas não quentes) e secos, sem temperaturas médias mensais acima de 22 °C durante seu mês mais quente e uma média no mês mais frio entre -3 e 18 °C ou, em algumas aplicações, entre 18 e 0 °C.

Além disso, pelo menos quatro meses devem ter uma média de temperatura superior a 10 °C. Os invernos são chuvosos e podem ser de amenos a frios. Em alguns casos, a neve pode cair nessas áreas. Precipitação ocorre nas estações mais frias, mas há uma série de dias ensolarados, mesmo durante as estações mais húmidas. Climas Csb são encontrados no noroeste da Ibéria, nomeadamente na Galiza e no norte de Portugal, como é o caso de Viana do Castelo.

5.2 Ferramentas de Estudo

5.2.1 Equipamentos utilizados na medição de ruído

Para as medições de ruído foi usado um sonómetro, o SC310 da CESVA que é um sonómetro integrador de Classe 1. O SC310 mede todas as funções (Funções S, F e I) simultaneamente com as 3 ponderações frequenciais (A, C e Z), calcula numa única escala (23 – 137 dB(A); até 140 dB de pico) homologado pelo Instituto Português da Qualidade, I. P. em Diário da República, III Série, nº50 a 11 de março de 2005, com o Despacho- Aprovação do Modelo 245.70.04.3.45.

Antes da medição é necessário verificar a sensibilidade do sonómetro, assim foi usado o calibrador CB006, da CESVA que é um Calibrador acústico classe 1 que cumpre a norma IEC 60942:2003 classe 1, homologado pelo Instituto Português da Qualidade, I. P. com o Despacho n.º 32190/2008.

A avaliação do ruído ambiente cumpriu a norma ISO 1996-2 (atual ISO 1996-2:2021) que deteta as componentes tonais, impulsividade e análise de frequência do ruído. O sonómetro integrador com ponderação A, classe 1 segundo as normas internacionais IEC 61672, IEC 60651, IEC 60804 e ANSI S1.4 e ANSI S1.43. Também é um analisador espectral em tempo real por bandas de terços de oitava e oitavas, com filtros classe 1 segundo IEC 61260 e 61260. O SC310 também cumpre a norma ANSI S1.11 sobre filtros.

Tabela 20: Equipamentos necessário para a medição de ruído

Equipamentos	O que mede os Sensores	Especificações técnicas
Sonómetro SC310 da CESVA (Microfone)	Ruído com os índices básicos de avaliação acústica: Funções S, F e I, Níveis contínuos equivalentes, Percentis, Índices de impulsividade, Níveis de pico, Níveis de exposição sonora, Short Leq, etc	Influência da Humidade Relativa: Escala de funcionamento: 25 a 90 % Erro máximo para 25%<Humidade Relativa <90% a 40 °C e 1 kHz: 0,5 dB Influência da Temperatura: Escala de funcionamento: -10 a +50 °C Erro máximo (-10 a +50°C): 0,5 dB Influência das vibrações: Para frequências de 20 a 1000 Hz e 1 m/s ² : < 75 dB(A)
Calibrador CB006, da CESVA,	Ajusta a sensibilidade do sonómetro	Distorção < 2% Humidade relativa 25 a 90 % Precisão estática de funcionamento 65 kPa a 108 kPa Temperatura de funcionamento -10°C a +50°C Classe 1

Para a realização das medições de ruído ambiente foi utilizado um analisador de ruído Cesva310, sonómetro de classe 1, devidamente calibrado, constituído pelos seguintes elementos: sonómetro, software de análise sonora, amplificador de entrada, um microfone e um tripé. Foi utilizado ainda um software de transferência dos dados do sonómetro para o suporte informático: SFT Cesva Capture Studio Software– que permitiu, após a realização de medições, transferir os resultados obtidos, guardá-los, visualizá-los e processá-los num PC.

5.2.2 Ferramentas de simulação do ruído

Para as simulações do ruído, utilizou-se o software CadnaA como um software que incorpora o método de previsão de ruído CNOSSOS – EU (Métodos Comuns de Avaliação do Ruído da Europa) enquanto metodologia operacional comum que permita avaliar o ruído ambiental exterior que simultaneamente possa melhorar a obtenção de dados comparáveis e implementar as obrigações legais da exposição a ruído na Europa (APA, 2022).

Os indicadores de ruído utilizados na elaboração destes estudos foram o nível sonoro contínuo equivalente, apresentado na escala de ponderação A para o período de dia (Ld) por ser o indicador de ruído Leq(A) correspondente ao período diurno.

O modelo geográfico da área em estudo, região de investigação, a contribuição do tráfego rodoviário e os fenómenos físicos mais significativos na radiação e propagação das ondas sonoras foram tidos em consideração na previsão dos níveis sonoros.

A posição das fontes de ruído no sistema de coordenadas, a sua dimensão, a sua potência sonora e o seu tipo são características que são definidas com base num conjunto de critérios que variam consoante o tipo de fonte. Por exemplo, as características das fontes rodoviárias incluem o volume de tráfego, a velocidade do tráfego e a proporção de veículos pesados, o tipo de pavimento, entre outras.

Na emissão do ruído considera-se necessário ter em linha de conta as características de absorção do meio, as configurações de rua, a distância entre a linha da fonte e do recetor ou a localização dos pontos recetores na fachada de um edifício. São todas estas premissas que interagem com o processo de propagação do ruído e como o nível de ruído é recebido e calculado nas fachadas.

5.2.3 Equipamentos utilizados na medição da radiação solar

Para a medição da radiação global equivalente nas superfícies das amostras, foi escolhido o método alternativo E1918A (medições in situ). A escolha do método alternativo deveu-se ao facto de o método ASTM E1918 exigir amostras de grandes dimensões, o que dificulta o seu transporte e a aquisição de espaço para a sua colocação. O método ASTM C1549 requer equipamento mais dispendioso e o método ASTM E903 só pode ser utilizado para medições em laboratório.

Assim, para medir a radiação solar global, foram escolhidos três sensores de medição da radiação solar - um Piranómetro de Silício (modelo Skye SP1110), um Piranómetro de Termopilha (modelo LP PYRE 02) e um Medidor de Energia Solar (modelo SM²06-Solar), conforme estudo comparativo representado no artigo científico de Oliveira *et al.* (2024) (Anexo III). A Tabela 21 apresenta o resumo de desempenho.

Tabela 21: Resumo de desempenho dos equipamentos de medição de acordo com o fabricante

#	Instrumento/Modelo	Medição	Unidade de medida	Precisão [%]	Amplitude
1	Skye SP11100 SN: 31633	Radiação Solar Global	W/m ²	±5%	1- 1100 W/m ²
2	LP PYRE 02 Model	Radiação Solar Global	W/m ²	±5%	0- 4000 W/m ²
3	KKMOON SM ² 06	Radiação Solar Global	W/m ²	±5%	1-3999 w/m ²

O piranómetro de termopilha foi escolhido como sensor de referência porque é o equipamento que cumpre as normas ISO e, por conseguinte, tem a resposta mais fiável às diferentes amplitudes térmicas. Nomeadamente, por funcionar linearmente, gerando mais corrente elétrica com um maior gradiente de temperatura medido, ou seja, se a radiação solar incidente duplicar, gera o dobro da corrente elétrica.

Por outro lado, este sensor também responde de forma direcional, mede a irradiância máxima quando o sol está diretamente acima (ângulo zenital de 0°) e não deteta nada quando o sol está no horizonte (ângulo zenital de 90°). Assim, o sinal elétrico do piranómetro varia com o cosseno do ângulo [$\cos(\theta)$] entre o Sol e a normal do equipamento, um dos parâmetros que influenciam as incertezas do piranómetro.

Assim, o piranómetro de termopilha foi utilizado para medir a radiação solar numa amostra uniforme (todo o edifício do estudo de caso tem o mesmo material de revestimento) com uma área de superfície de aproximadamente 1 m². Esta técnica (designada por E1918A) foi utilizada para medir a radiação solar global em diferentes pontos de medição in situ. Os outros dois equipamentos de medição, o pirómetro de silício e o medidor solar apesar de não preencherem os requisitos da norma ISO 9060, seguem as recomendações da Organização Meteorológica Mundial (OMM) em termos de equipamentos de medição de radiação solar.

As medições decorreram em tempo real no dia 17 de fevereiro de 2023, ao longo de todo o dia, iniciando-se no ponto de medição PC1 às 9:40 e terminando com a última medição no ponto de medição PC4 às 18:40. Para cada ponto de medição / recolha de dados (PC), foram efetuadas 5 medições ao longo do dia, representativas das diferenças solares do dia (hora solar).

5.2.4 Ferramentas de simulação da radiação solar

Para o cálculo da radiação solar, a metodologia adotada foi a modelação do edifício e do seu contexto urbano, incluindo o quarteirão onde se insere, o terreno com a sua topografia e os edifícios existentes que ladeiam as ruas envolventes. A modelação foi feita a partir de um programa BIM (Building Information Modelling) (Archicad) que permitiu a articulação com o Grasshopper 3D - um plugin para o Rhino 3D, que é uma das principais ferramentas de modelação paramétrica.

As simulações de radiação solar efetuadas foram baseadas em dados climáticos disponíveis em formato Energy Plus Weather File (Epw) para Viana do Castelo. O ficheiro é validado com os dados sintéticos do INETI para Portugal e pelo Instituto Português de Meteorologia e está disponível no site da Climate.OneBuilding (2023).

O Ladybug é um *plugin* do Grasshopper que permite realizar análises detalhadas de dados climáticos para produzir visualizações personalizadas e interativas para um projeto ambientalmente informado, nomeadamente através de estudos de radiação e sombreamento solar (Ladybug, 2024). O estudo de caso utilizou o Ladybug para definir os componentes da análise da radiação solar (volumes e geometrias) de modo que o objeto de análise seja simultaneamente objeto e contexto (envolvente). O modelo de simulação recorre também ao *plugin* Honeybee que utiliza grelhas e vistas que permitem visualizar melhor o estudo da radiação solar e do sombreamento solar.

O componente *HB Annual Irradiance* executa um estudo de radiação anual para o modelo Honeybee ao calcular a incidência solar horária para cada sensor nas grelhas (de sensores) do modelo. O cálculo fundamental desta fórmula é o mesmo que o da *HB Annual Daylight*, do Ladybug na medida em que é utilizado um método de 2 fases melhorado para contabilizar com precisão a radiação solar direta em cada passo da simulação. No entanto, esta metodologia calcula a radiação solar de banda larga em W/m^2 em vez da iluminância visível em lux, mais comum na utilização do conjunto de componentes do Honeybee.

Consequentemente, os valores médios de radiação e radiação acumulada produzidos por esta forma de cálculo são mais exatos do que os produzidos pela forma de cálculo do componente *HB Cumulative Radiation*. Além disso, como os valores horários de radiação são exatos, esta solução pode ser utilizada para avaliar a radiação de pico e determinar as cargas solares mais desfavoráveis em dias de céu limpo que representam geralmente dias com necessidades de arrefecimento.

Apesar de ser um componente Ladybug, foi aceite e processado pelo *HoneyBee* (componente *Sensor Grid*), que nos permite evoluir na definição para conseguirmos as medições considerando as características das superfícies dos volumes e geometria. A criação dum objeto pelo *Sensor Grid* pode ser usada numa rotina baseada em grelhas. Neste caso, simula o sensor analógico a partir dos pontos definidos na componente anterior. É usada uma malha opcional (*mesh*) que se alinha com os sensores. Isto é útil para gerar visualizações da grelha de sensores para além das posições dos sensores (*base_geo*).

Na composição da simulação é criada uma estrutura (*Brep*) opcional para a geometria utilizada para criar a grelha. Não há restrições sobre como este (*brep*) se relaciona com os sensores e é fornecido apenas para ajudar na visualização da grelha quando o número de sensores ou a malha é demasiado grande para ser visualizada de forma prática.

Esta utilização destes componentes (como o *SensorGrid*) foi uma adaptação, uma vez que geralmente este sistema é para medição interior e corresponde a, por exemplo, pavimento de um compartimento. Neste caso foi utilizado para simular o sensor de medição exterior.

Antes de passar ao componente que relaciona a grelha e a geometria exterior, recorreu-se a um componente (*HB Model*), que pode ser utilizado para a simulação como uma lista de espaços "honeybee" a adicionar ao modelo que simulará a radiação anual. Note-se que é necessário pelo menos uma divisão para criar um

modelo energético simulável. Nesta entrada, reuniram-se todas as geometrias de terreno e edifícios envolventes ao sensor. De salientar que para cada ponto de medição foi criada uma envolvente, uma vez que o tempo de cálculo estava a ser excessivo (aproximadamente 02h00 por cada medição).

O modelo anteriormente descrito e mencionado produz a partir dos componentes Wea ou um ficheiro .wea ou .epw, utilizado o componente *HB Wea from Epw*, permite a entrada dos dados climáticos. A radiação acumulada em kWh/m² durante o período de tempo de Wea. Este foi o *output* utilizado para recolher os dados. Para as definições de radiação no período equivalente ao das medições *in situ*, a metodologia foi a seguinte:

Criar um objeto Wea a partir de um ficheiro EPW (neste caso, de Viana do Castelo), onde são introduzidos os seguintes dados:

- Localização completa de um ficheiro meteorológico .epw.(epw_file [Obrigatório])
 - Localização completa de um ficheiro meteorológico .epw. O ficheiro utilizado foi PRT_NO_Viana.do.Castelo-Chafe.085510_TMYx.2007-2021.epw que contém os dados climáticos do período compreendido entre 2007 e 2021 obtido a partir do portal https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/PRT_Portugal/index.html na data de 05 de março de 2022.
- Uma lista opcional de horas do ano (números de 0 a 8759) para as quais o Wea vai ser especificado (Hoys). Por defeito, o Wea é gerado para o ano inteiro.
- Um número inteiro que representa o intervalo de tempo utilizado para criar o objeto WEA. A predefinição é 1 para 1 passo por hora do ano (timestep).

As ferramentas Ladybug tools utilizam o EnergyPlus (EnergyPlus (Big Ladder Software), 2024) como motor de simulação para a modelação energética. Uma vez que são sempre baseadas nas normas ASHRAE, a fórmula utilizada é adotada a partir de uma revisão introduzida pela ASHRAE 2009 HOF no modelo de céu limpo baseado nas profundidades óticas específicas de cada local para radiação direta e difusa, nomeadamente, o modelo ASHRAE Revised Clear Sky Model (“Tau Model”).

O modelo requer massa de ar, m, calculada pela seguinte equação:

$$m = \frac{1}{[\sin\beta + 0.50572 \cdot (6.07995 + \beta)^{-1.6364}]} \quad (14)$$

Em que:

β = altitude solar, graus.

As irradiâncias direta e difusa são determinadas com as seguintes relações:

$$E_b = E_o \cdot \exp [-\tau_b \cdot m \cdot a_b] \quad (15)$$

$$E_d = E_o \cdot \exp [-\tau_d \cdot m \cdot a_d] \quad (16)$$

Onde:

E_b = irradiância normal do feixe, W/m²

E_d = irradiância horizontal difusa,

E_o = irradiância normal extraterrestre,

m = massa de ar

τ_b e τ_d = profundidades óticas difusa e de feixe (a partir de dados de conceção climática ASHRAE)

a_b e a_d = expoentes de massa de ar difuso e de feixe (ou de irradiação direta normal)

Valores de τ_b e τ_d são específicos de cada local e variam ao longo do ano. Incorporam a dependência da radiação solar do céu limpo das condições locais, como a altitude, o teor de água de precipitação e os aerossóis.

Os expoentes da massa de ar a_b e a_d foram correlacionados com τ_b e τ_d através das seguintes relações empíricas:

$$a_b = 1.219 - 0.043 \cdot \tau_b - 0.151 \cdot \tau_d - 0.204 \cdot \tau_b \cdot \tau_d$$

$$a_d = 0.202 + 0.852 \cdot \tau_b - 0.007 \cdot \tau_d - 0.357 \cdot \tau_b \cdot \tau_d$$

De acordo com estudos realizados no âmbito de projetos de investigação da ASHRAE, o modelo Tau revisto (Equação (14)) produz valores de irradiância fisicamente mais plausíveis do que o modelo tradicional de céu limpo. O modelo tau é o descrito e utilizado por este componente (EnergyPlus (Big Ladder Software), 2024). Em particular, os valores de irradiância difusa são mais realistas. Consequentemente, os valores médios de radiação e radiação acumulada produzidos por esta forma de cálculo são mais exatos do que os produzidos pela forma de cálculo do componente "HB Cumulative Radiation". Além disso, como os valores horários de

radiação são exatos, esta solução pode ser utilizada para avaliar a radiação de pico e determinar as cargas solares mais desfavoráveis em dias de céu limpo que representam geralmente dias com necessidades de arrefecimento. Com esta definição chegaram-se aos valores apresentados nas tabelas seguintes e para o processo de validação, foram garantidas as mesmas condições meteorológicas, a mesma base geográfica e os mesmos pontos de medição (coordenadas x, y, z).

5.3 Validação dos modelos

A caracterização do ruído ambiente da cidade de Viana do Castelo foi baseada em métodos previsionais e complementada com medições acústicas para calibração do modelo. A previsão dos níveis sonoros teve em conta a contribuição do tráfego rodoviário, a topografia da zona em estudo e os fenómenos físicos mais relevantes na radiação e propagação das ondas sonoras.

Tendo a densidade da grelha de cálculo implicação direta com a resolução espacial do mapa de ruído e com o tempo de cálculo associado, é necessário estabelecer um compromisso equilibrado entre estes dois aspetos. Assim foram definidos pontos recetores, com uma cota de 1.5 metros acima do terreno, e localizados ao longo do estudo de caso e de forma abranger análises diferentes na relação fonte de ruído (vias de tráfego automóvel) e recetor de ruído (fachadas do caso de estudo). As amostras dos pontos de medição in situ vão corresponder aos pontos recetores no modelo simulado.

As coordenadas e as condições de medição foram reproduzidas no modelo de simulação. Neste contexto, a caracterização do ruído ambiente na cidade de Viana do Castelo desenvolveu-se através da seguinte sequência de tarefas:

- Levantamento das fontes de ruído ambiental do estudo de caso incluiu contagem de veículos automóveis por tipo de veículo (de acordo com Cnossos);
- Modelação do ruído através do modelo de previsão de ruído ambiente Cnossos e cálculo do nível sonoro contínuo equivalente ($Leq(A)$) para o período diurno, a partir do tráfego rodoviário existente;
- Determinação do ruído no recetor (pontos de validação).

A caracterização do estudo de caso em termos solares, na cidade de Viana do Castelo foi também baseada em métodos de simulação e auxiliada por medições de radiação solar para calibração do modelo.

- Para a previsão do estudo de radiação solar teve-se em conta a contribuição da topografia, da envolvente edificada e orientação solar;
- Determinação da radiação no recetor (pontos de validação);

5.3.1 Ruído (Validação)

5.3.1.1 Seleção de Pontos de Medição “in situ” (pontos de validação)

Para a obtenção dos níveis de ruído nas fachadas, em termos de indicadores de ruído, neste caso o $Leq(A)$ foi selecionados pontos de medição/validação a partir do estudo de caso na cidade de Viana do Castelo. Os pontos de medição foram escolhidos segundo um critério de abrangência e diversificação em relação às fontes de ruído (vias de tráfego automóvel circundantes), tendo por base a escolha de zonas com e sem obstrução ou obstáculos à propagação do ruído e assim proporcionar uma amostra de zonas propícias ao sombreamento acústico e outras de exposição direta ao ruído.

Nas medições efetuadas para além dos parâmetros e critérios anteriormente referenciados, todas as vias estão niveladas em relação à superfície natural do terreno.

As vias que servem as três áreas selecionadas para validação possuem as seguintes características:

- vias simples de sentido único
- vias de acesso local
- pavimento
- velocidade de circulação

5.3.1.2 Contagem de Tráfego

As fontes de ruído são caracterizadas pela sua posição no sistema de coordenadas, dimensão, potência sonora e tipo de fonte, sendo tais aspetos determinados a partir de um conjunto de parâmetros segundo o tipo de fonte. Para as fontes rodoviárias, os parâmetros que caracterizam estas fontes são: volume de tráfego, velocidade de circulação e percentagem de veículos pesados.

De forma a avaliar o nível de ruído produzido procedeu-se a uma contagem de tráfego automóvel em simultâneo com a medição de ruído com o sonómetro nos pontos de validação. A contagem de tráfego foi feita de forma manual e com registo de início e fim de contagem (modelo de ficha técnica de medição consta no Anexo I).

Os veículos contados foram agrupados nas categorias estabelecidas pela emissão sonora de veículos rodoviários, segundo a Diretiva 2007/46/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 5 de setembro de 2007 (APA, 2023; Kephelopoulos, Paviotti and Anfosso-Lédée, 2012).

Para determinar o volume de tráfego contou-se o número de veículos que passam numa determinada secção da via na unidade de tempo (00.15 h cada PC). Neste caso, o volume de fluxo foi para um período de uma hora. A composição do tráfego teve em linha de conta a percentagem dos diferentes tipos de veículos que compõem a corrente de tráfego, no que diz respeito ao fluxo de veículos ligeiros e pesados.

5.3.1.3 Ruído medido nos pontos de validação

O ruído ambiente proveniente do meio urbano, qualquer que seja o local, não é estacionário, apresenta variações no tempo que se revelam no sinal produzido através de quebras e picos.

Quando se pretende, como é o estudo de caso caracterizar o ruído produzido pelo tráfego rodoviário, dado o seu ruído ser flutuante, uma simples medição pontual do seu valor não é suficiente. Será necessário recorrer ao cálculo duma média, obtida após um tempo de medição representativo, bem como a indicadores que possam revelar os picos máximos e mínimos ocorridos durante o período de tempo de medição.

Na avaliação do ruído ambiente são em geral utilizados determinados indicadores de ruído que caracterizam o ambiente acústico exterior. São eles os indicadores médios, através do nível sonoro contínuo equivalente (Leq), que se define como o nível de pressão sonora constante, no qual a quantidade de energia acústica emitida durante um determinado período de tempo é a mesma do que o ruído flutuante efetivo emitido (L. Silva, 2009).

O Leq é o indicador internacionalmente adotado por ser o mais representativo do ruído observado num determinado local e durante um certo intervalo de tempo e é expresso em dB(A). As Tabelas 22, 23 e 24 apresentam as medições efetuadas nos Pontos de Validação.

Tabela 22: Medição do Ruído nos Pontos de Validação

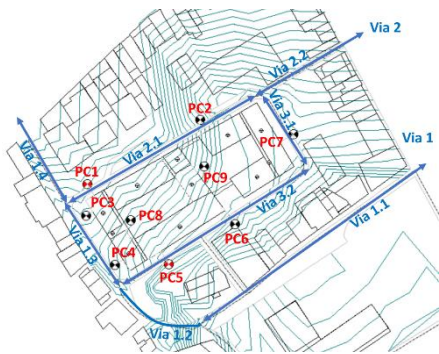
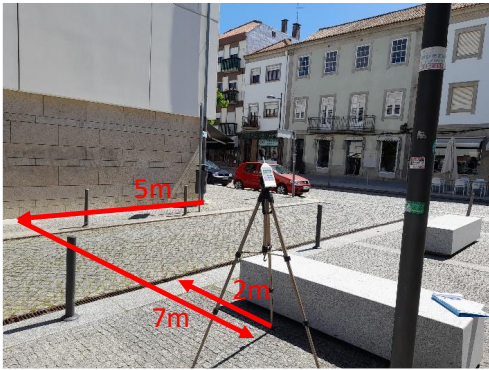
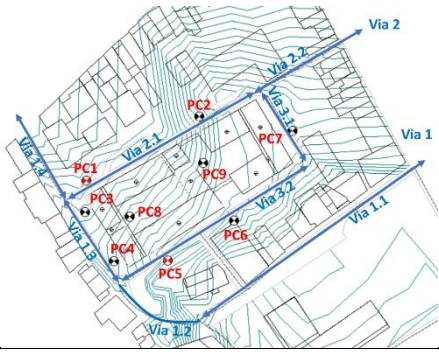
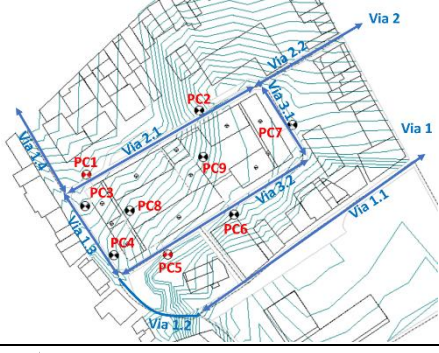
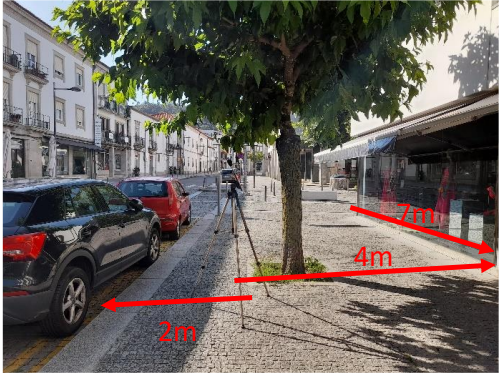
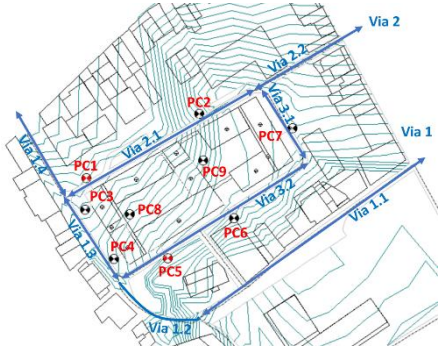
Ponto de Controle (PC)	Local de Medição	LeqA [dB(A)]
PC1	 	54,2
PC2	 	55,6
PC3	 	59,4
PC4	 	58,0

Tabela 23: Medição do Ruído nos Pontos de Validação (continuação)

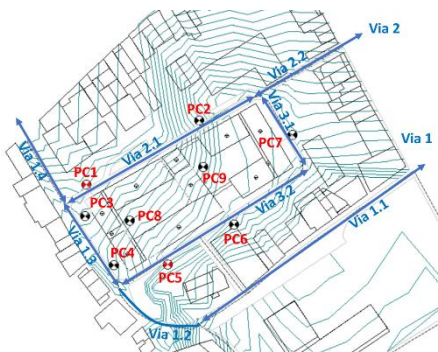
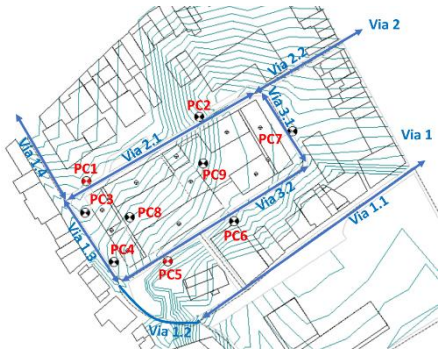
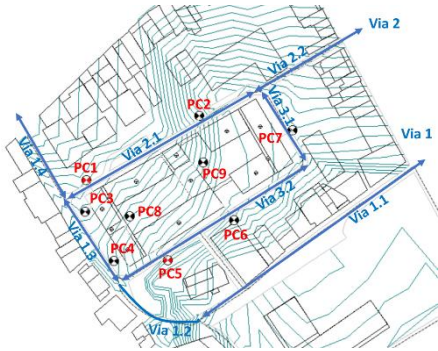
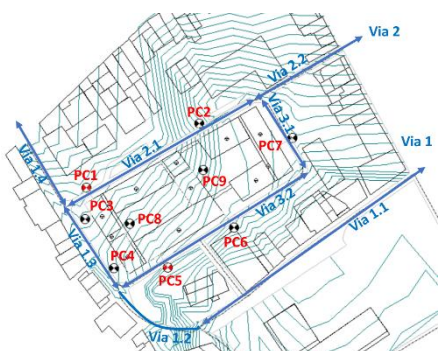
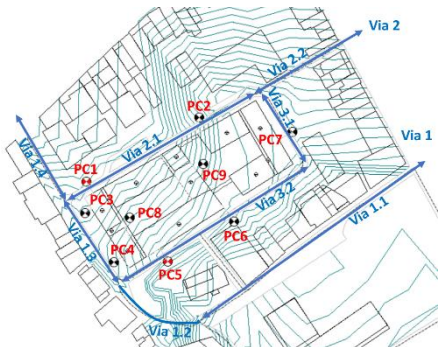
Ponto de Controle (PC)	Local de Medição	LeqA [dB(A)]
PC5		49,2
PC6		52,1
PC7		50,0
PC8		50,4

Tabela 24: Medição do Ruído nos Pontos de Validação (continuação)

Ponto de Controle (PC)	Local de Medição	LeqA [dB(A)]
PC9 		49,9
Modelo de Ficha de Medição no Anexo I		

5.3.1.4 Resultados comparativos entre pontos medidos e pontos modelados

A validação do modelo proposto seguiu os seguintes procedimentos: recolha dos níveis de ruído em pontos de validação (pontos recetores/ pontos de medição) e contagem de tráfego nas vias envolventes; modelação dos modelos reais com introdução de pontos recetores localizados nos pontos de medição; e validação dos modelos reais através da comparação dos valores obtidos na modelação com os valores das medições efetuadas. Nas Tabelas 25, 26 e 27, são ilustrados os níveis de ruído das medições "in situ" e os níveis de ruído obtidos na modelação, o que nos permitirá a comparação e avaliação da robustez do modelo.

Tabela 25: 1ª Validação (Valores medidos vs valores modelados)

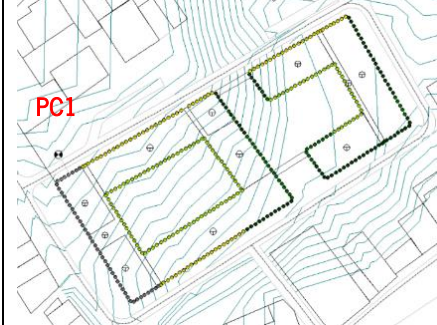
Ponto de validação (medição e simulação)	LeqA Medido dB(A)	LeqA Modelado dB(A)	Diferencial dB(A)
PC1 	54,2	54,2	0

Tabela 26: 1ª Validação (Valores medidos vs valores modelados) (continuação)

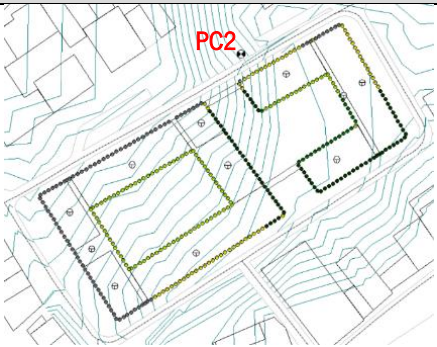
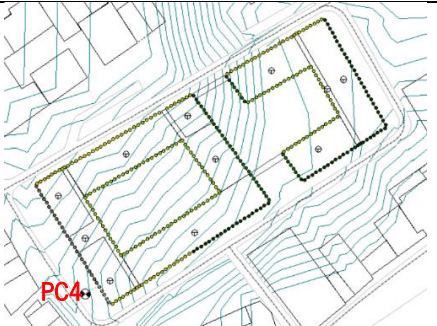
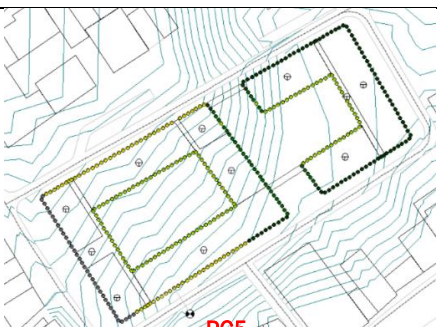
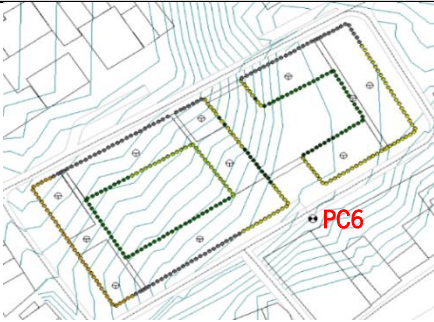
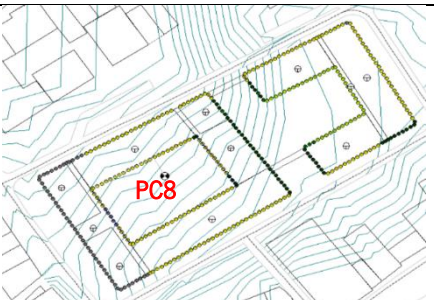
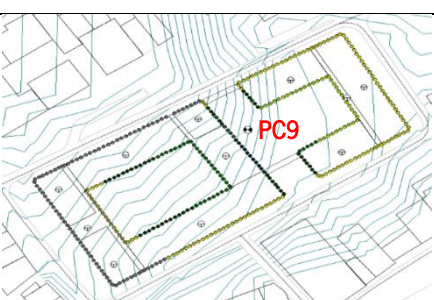
Ponto de validação (medição e simulação)		LeqA Medido dB(A)	LeqA Modelado dB(A)	Diferencial dB(A)
PC2		55,6	54,2	1,4
PC3		59,4	57,6	1,8
PC4		58,0	56,8	1,2
PC5		49,2 (Leq)	49,1 (Ld)	0,1

Tabela 27: Ponto de validação (medição e simulação) (continuação)

Ponto de validação (medição e simulação)		LeqA dB(A)	Medido	LeqA Modelado dB(A)	Diferencial dB(A)
PC6		52,1		50,6	1,5
PC7		50,0		49,9	0,1
PC8		50,4		48,5	1,9
PC9		49,9		48,8	1,1

O processo de validação traduz-se na prática por uma comparação dos valores modelados (calculados) nos pontos de validação (pontos recetores) com valores de medição representativos localizados nos pontos de validação. As características do modelo geográfico e das fontes de ruído são iguais, permitindo assim validar simultaneamente a qualidade dos dados de entrada e os algoritmos de cálculo do modelo de simulação utilizado.

O critério de validação, de acordo com a diretrizes da APA, é que o modelo pode-se considerar validado caso a diferença entre os valores calculados (modelados nos pontos recetores) e os valores medidos não ultrapassem ± 2 dB(A) (APA, 2023).

Tal como se pode verificar nas Tabelas 26 e 27 onde se apresenta a comparação entre os valores medidos em cada ponto de monitorização e os valores modelados nos pontos recetores, é verificada a condição de validação e o modelo está validado e os parâmetros de cálculo utilizados são os apresentados:

- A avaliação do nível de ruído nas fachadas, para a forma urbana original e para as 5 variações foi efetuada utilizando uma grelha de cálculo quadrada, gerada pelo CadnaA em todas as fachadas de 3,0 m x 3,0m e uma distância da fachada de 0,5 m.
- Ordem de reflexão: 2.
- Saída: Leq (A).
- Condições meteorológicas favoráveis à propagação do som.
- Temperatura: 15 C; Humidade: 70%.
- Número de pisos: 4 pisos.
- Altura de cada piso: 3 m (excluindo o rés do chão).
- Cota igual para todo o edificado: 20m (as alturas dos edifícios variam consoante a topografia, a altura varia entre os 12.5m e os 13,0m)

5.3.2 Radiação solar (Validação)

5.3.2.1 Radiação solar medida nos pontos de validação

Para o estudo da radiação solar foram escolhidos três sensores de medição de radiação solar, a saber - um Piranómetro de Silício (modelo Skye SP1110), um Piranómetro de Termopilha (modelo LP PYRE 02) e um Medidor de Potência Solar (modelo SM²06-Solar) - para medir dados pontuais em tempo real (17 de fevereiro de 2023). A radiação solar foi medida e modelada nos mesmos locais (Cidade de Viana do Castelo) e nas mesmas condições (localização dos pontos de recolha (PC). Foram mantidas as condições meteorológicas, mesmo número de horas de recolha para cada ponto) e as Tabelas 28, 29, 30 e 31 representam estas considerações e valores das medições *in situ*.

Tabela 28: Pontos de Medição da Radiação solar *in situ*

Fotografia panorâmica da envolvente do ponto de medição

PC1		Piranómetro de silício (W/m²)	Piranómetro de termopilha (W/m²)	Medidor Solar (W/m²)
Horas de medição (Informação recolhida pontual)	9h40	37,3	31,75	42
	11h40	41,9	37,9	47,7
	13h40	39,5	36,6	48,6
	15h40	36,6	34,63	41
	17h40	14,8	7,3	17
Horas de medição (Informação recolhida _média aritmética)	9h30-9h40	30,5	27	-
	11h30-11h40	36,8	39,2	-
	13h30-13h40	32	24,2	-
	15h30-15h40	38	36	-
	17h30-17h40	14,8	10,9	-

Modelo de Ficha técnica de medição no Anexo II

Tabela 29: Pontos de Medição da Radiação solar *in situ*



● Pontos de Controle de Medição (PC)



Fotografia panorâmica da envolvente do ponto de medição

PC2		Piranómetro de silício (W/m²)	Piranómetro de termopilha (W/m²)	Medidor Solar (W/m²)
Horas de medição (Informação recolhida pontual)	10h00	68,2	68,4	89
	12h00	659	306,8	101,6
	14h00	113,9	177,2	136
	16h00	54,7	44,8	58
	18h00	3,6	0	4
Horas de medição (Informação recolhida _média aritmética)	9h50-10h00	61,9	62,3	-
	11h50-12h00	383,3	445,9	-
	13h50-14h00	140,2	165,7	-
	15h50-16h00	56,5	46,4	-
	17h50-18h00	5,7	0,23	-

Modelo de Ficha técnica de medição no Anexo II

Tabela 30: Pontos de Medição da Radiação solar *in situ*

● Pontos de Controle de Medição (PC)

Fotografia panorâmica da envolvente do ponto de medição

PC3		Piranómetro de silício (W/m²)	Piranómetro de termopilha (W/m²)	Medidor Solar (W/m²)
Horas de medição (Informação recolhida pontual)	10h20	77,8	71,9	86,7
	12h20	679,5	541,7	575,8
	14h20	653,6	517,2	920,8
	16h20	34,3	31,7	39
	18h20	0,66	0	0,6
Horas de medição (Informação recolhida _média aritmética)	10h10-10h20	76,3	70,1	-
	12h10-12h20	660,9	627,5	-
	14h10-14h20	675,2	533,6	-
	16h10-16h20	36,4	33,5	-
	18h10-18h20	1,35	0	-

Modelo de Ficha técnica de medição no Anexo II

Tabela 31: Pontos de Medição da Radiação solar *in situ*

● Pontos de Controle de Medição (PC)

Fotografia panorâmica da envolvente do ponto de medição

PC4		Piranómetro de silício (W/m²)	Piranómetro de termopilha (W/m²)	Medidor Solar (W/m²)
Horas de medição (Informação recolhida pontual)	10h40	652,1	595,9	1118
	12h40	679,5	713,3	1108
	14h40	500,4	517,2	1033
	16h40	31,0	27,1	40
	18h40	0	0	0
Horas de medição (Informação recolhida _média aritmética)	10h30-10h40	626,0	586,1	-
	12h30-12h40	767,2	717,1	-
	14h30-14h40	523,2	454,7	-
	16h30-16h40	32,7	29,3	-
	18h30-18h40	0	0	-

Modelo de Ficha técnica de medição no Anexo II

Da análise das Tabelas 28, 29, 30 e 31 pode concluir-se que, à medida que as medições se aproximam da hora de almoço (12:00-14:00), onde há uma maior amplitude térmica, a medição da radiação é também maior e a suscetibilidade do equipamento à variação térmica também oscila, dependendo do tipo de sensor. O piranómetro de silício é mais sensível à temperatura e à luz, uma vez que é um sensor calibrado em condições de céu aberto, em comparação com os piranómetros de referência, ou seja, de acordo com a Referência Radiométrica Mundial.

Devido às diferentes respostas espectrais da fotocélula de silício e das termopilhas, para obter leituras precisas, o SP1110 deve ser utilizado em condições de iluminação natural e em diferentes condições de sol, nuvens, etc., que afetam a calibração. No entanto, a calibração de referência do piranómetro de silício em relação à energia solar (banda de onda de 300nm a 3000nm) é a banda de aceitação dos piranómetros de termopilha. Neste sentido, com exceção da hora solar (PC2), o comportamento do piranómetro de silício é semelhante ao do piranómetro de termopilha, como se pode observar nos pontos de recolha de dados PC1, PC3 e PC4 na Figura 49.

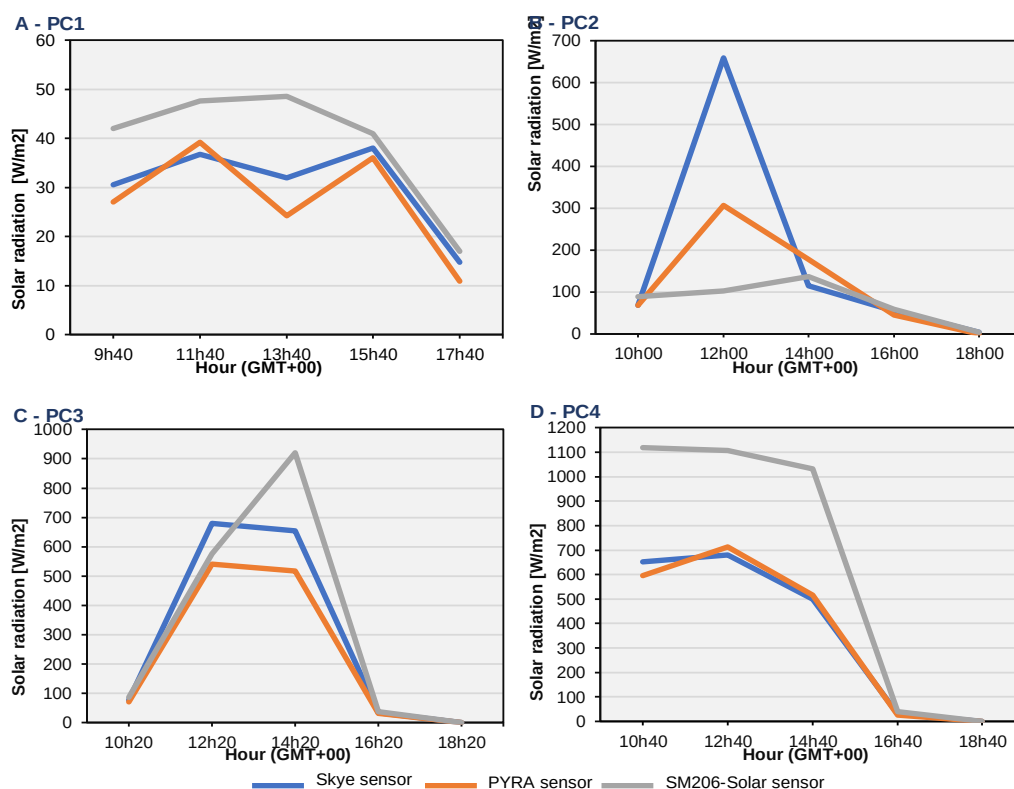


Figura 49: Medições da radiação solar em quatro pontos de recolha de dados (A - PC1; B - PC2; C - PC3; D - PC4)

Por outro lado, o solar metro, também devido à sua configuração e sensibilidade à temperatura de funcionamento (-10°C a 60°C), tende a dar valores mais elevados do que o instrumento de termopilha, que é o dispositivo de medição de referência neste estudo de caso.

Os piranômetros apresentam valores mais próximos uns dos outros em comparação com o medidor solar, como é possível verificar nas várias medições efetuadas em diferentes momentos do dia nos quatro pontos de medição.

Os três equipamentos de medição utilizados no estudo de caso, sob as mesmas condições e com precisão e alcance aparentemente semelhantes, visíveis na Tabela 21, captam e medem valores diferentes, como foi possível verificar anteriormente (Figura 7A-D).

O piranómetro de termopilha foi escolhido como sensor de referência por ser o equipamento que cumpre as normas ISO e por ser o que fornece os valores mais fiáveis para as diferentes amplitudes térmicas que ocorrem ao longo do dia nas diferentes medições e horas solares, como se pode ver na Figura 49.

A Figura 50 mostra a comparação entre os três dispositivos de medição, mas usando o piranómetro de termopilha como referência. Como se pode verificar, o piranómetro de silício tem um comportamento mais assertivo e uma linha de tendência ligeiramente superior ($R^2 = 0,911$) à do medidor solar ($R^2 = 0,900$).

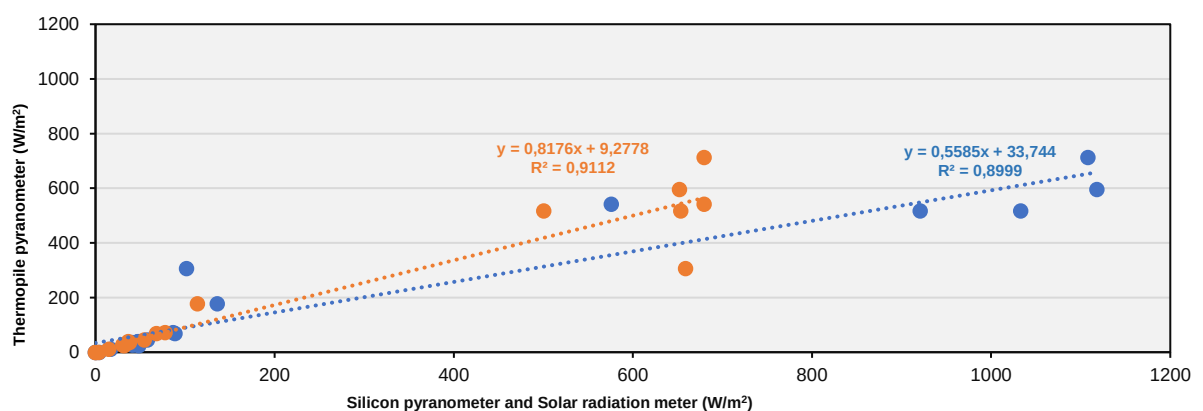


Figura 50: Comparação entre o piranómetro de termopilha e os outros dois sensores (piranómetro de silício (laranja) e medidor de radiação solar (azul))

Uma análise comparativa da figura anterior mostra que à medida que a irradiância solar aumenta, a dispersão dos valores também aumenta. Como já foi referido, uma das explicações para este fenómeno é a sensibilidade do equipamento ao aumento da temperatura (ambiente).

A metodologia proposta aborda as incertezas ou imprecisões dos equipamentos e/ou medições in situ, que estabelece corretamente o que cada equipamento mede e em que situações são considerados aceitáveis, quer por normas, quer em resposta a pedidos.

A exatidão e precisão de todo o processo é muito complexa, na medida em que se pretende analisar quais os componentes que provocam maior erro de precisão.

Como se pode verificar pela observação das medições e das características dos equipamentos utilizados, em termos simplistas, a linha de tendência das medições ao longo do dia e nos 4 pontos de medição são semelhantes.

Mas se olharmos para os valores obtidos em cada hora de medição e em cada ponto de medição, verificamos que em termos nominais existem flutuações de valores, sobretudo quando comparamos os valores do solarímetro com os dos piranómetros. E se considerarmos a comparação entre o piranómetro de silício e o piranómetro de termopilha, também podemos ver a diferença nominal.

Os erros do equipamento são inerentes ao tipo de piranómetro utilizado e à calibração aplicada, e incluem o erro zenital (erro de cosseno), o erro azimutal, a estabilidade, a não linearidade, a dependência da temperatura e a resposta espectral. Os registos de maior qualidade são obtidos com piranómetros de termopilha, que se baseiam no efeito termoelétrico.

No caso das termopilhas, como já foi referido, a norma ISO 9060/1990 (ISO, 1990; Niewianda & Heidt+, 1996) e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) (WMO (World Meteorological Organisation), 2008) estabeleceram três níveis de qualidade: Padrão Secundário ou Alta Qualidade; Primeira Classe ou Média Qualidade; e Segunda Classe ou Baixa Qualidade.

As principais diferenças estão relacionadas com o tempo de resposta, a resolução, a estabilidade, a linearidade e a seletividade espectral (Paulescu *et al.*, 2013).

O estudo de caso mostrou que os instrumentos utilizados para medir o mesmo parâmetro, independentemente de cumprirem ou não normas e padrões com diferentes níveis de qualidade de equipamento, não são suficientes para fornecer dados precisos sobre a radiação solar que atinge uma superfície de diferentes formas (direta, difusa ou refletida), principalmente devido às limitações de cada instrumento.

No entanto, os valores apresentados do estudo são válidos por cumprirem os procedimentos de medição estabelecidos nas normas ISO e OMM.

5.3.2.2 Resultados Comparativos de radiação solar (Pontos Medidos vs Pontos Modelados)

O estudo proposto seguiu os seguintes procedimentos: recolha dos níveis de radiação solar global medidos em pontos de controlo (PC), modelação do estudo de caso com incorporação destes pontos, simulação do estudo de caso para os referidos pontos e validação dos Pontos Simulados através da comparação dos valores obtidos na modelação com os valores das medições.

Nas Tabelas 32 e 33, são ilustrados os níveis de radiação solar das medições "in situ" e a radiação solar obtidos na simulação, que permitirá a primeira validação e comparação do estudo solar.

Tabela 32: Diferencial dos Pontos Simulados e dos Pontos Medidos (PC1) e (PC2)

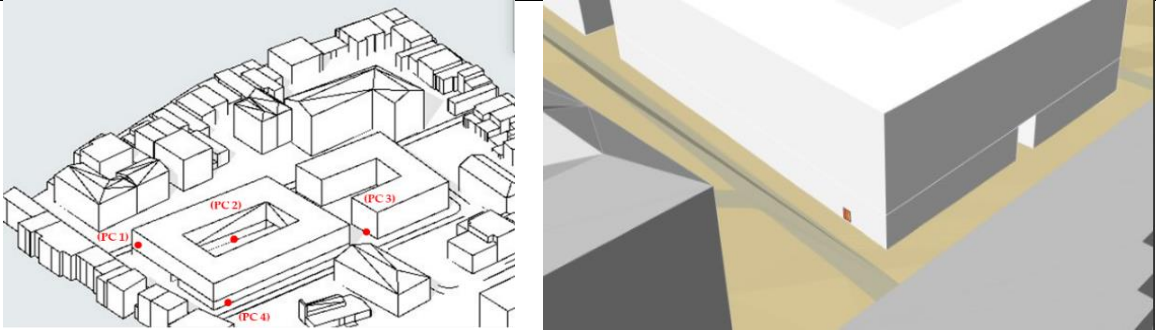
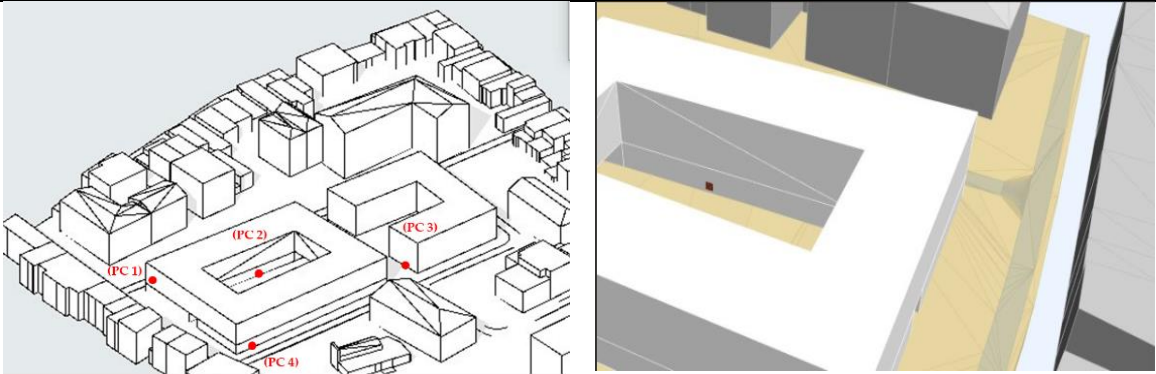
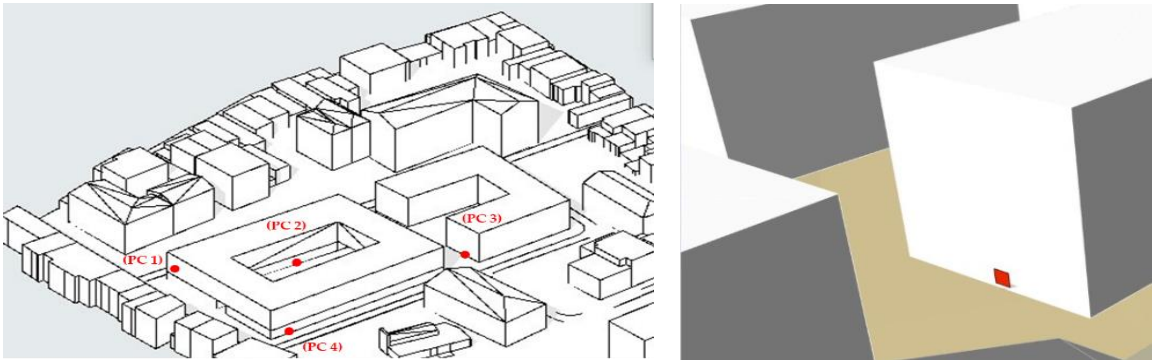
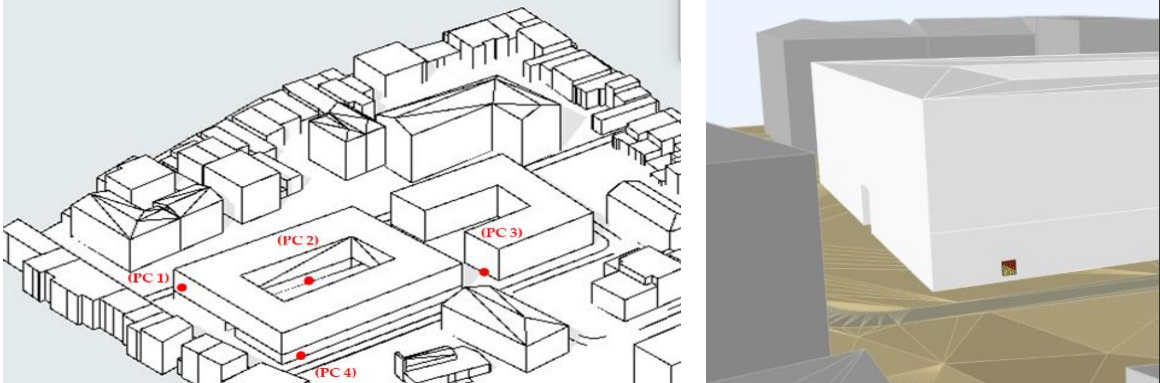
Ponto de controle (medição e simulação)						
						
PC1	Horas de medição (média aritmética)	Pontos Medidos com Piranómetro de silício (W/m²)	Pontos Medidos Piranómetro termopilhas (W/m²)	Pontos Simulados (W/m²)	Diferencial Piranómetro de silício (W/m²)	Diferencial Piranómetro termopilhas (W/m²)
	9h30- 9h40	30,5	27,0	28,1	-2,4	1,1
	11h30-11h40	36,8	39,2	38,8	2,0	-0,4
	13h30-13h40	32,0	24,2	26,3	-5,7	2,1
	15h30-15h40	38,0	36,0	38,7	0,7	2,7
	17h30-17h40	14,8	10,9	10,1	-4,7	-0,8
Ponto de controle (medição e simulação)						
						
PC2	Horas de medição (média aritmética)	Pontos Medidos com Piranómetro de silício (W/m²)	Pontos Medidos Piranómetro termopilhas (W/m²)	Pontos Simulados (W/m²)	Diferencial Piranómetro de silício (W/m²)	Diferencial Piranómetro termopilhas (W/m²)
	9h50-10h00	61,9	62,3	66,4	4,5	4,1
	11h50-12h00	383,3	445,9	466,9	83,7	21,1
	13h50-14h00	140,2	165,7	324,9	184,7	159,2
	15h50-16h00	56,5	46,4	76,97	20,5	30,6
	17h50-18h00	5,7	0,23	7,11	1,4	6,9

Tabela 33: Diferencial dos Pontos Simulados e dos Pontos Medidos (PC3) e (PC4)

Ponto de controle (medição e simulação)						
						
PC3	Horas de medição (média aritmética)	Pontos Medidos com Piranómetro de silício (W/m ²)	Pontos Medidos Piranómetro termopilhas (W/m ²)	Pontos Simulados (W/m ²)	Diferencial Piranómetro de silício (W/m ²)	Diferencial Piranómetro termopilhas (W/m ²)
	10h10-10h20	76,3	70,1	67	-9,3	-3,1
	12h10-12h20	660,9	627,5	448,05	-212,9	-179,5
	14h10-14h20	675,2	533,6	561,91	-113,3	28,3
	16h10-16h20	36,4	33,5	35,02	-1,4	1,5
	18h10-18h20	1,35	0,0	1,52	0,2	1,5
Ponto de controle (medição e simulação)						
						
PC4	Horas de medição (média aritmética)	Pontos Medidos com Piranómetro de silício (W/m ²)	Pontos Medidos Piranómetro termopilhas (W/m ²)	Pontos Simulados (W/m ²)	Diferencial Piranómetro de silício (W/m ²)	Diferencial Piranómetro termopilhas (W/m ²)
	10h30-10h40	626,0	586,1	550,0	-76,0	-36,1
	12h30-12h40	767,2	717,1	741,2	-26,0	24,1
	14h30-14h40	523,2	454,7	528,1	4,9	73,4
	16h30-16h40	32,7	29,3	40,68	8,0	11,4
	18h30-18h40	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

As validações empíricas comparam normalmente os resultados da simulação com as medições de radiação solar a partir de equipamentos que por si só já têm condicionantes, uma margem de erro, de incerteza e precisão, que influenciam os resultados da medição como foi possível averiguar no estudo comparativo dos 3 equipamentos de medição de radiação. Conceptualmente, estas validações aproximam-se do objetivo geral de validação, mas, em alguns casos, apresentam limitações na precisão das medições e na definição geral das condições de fronteira da simulação.

Existem vários modelos de cálculo de erros padrão o modelo MAE (Mean Absolute Error) ou o RMSE (RootMeanSquared Error) são duas medidas de erro absoluto utilizadas numa grande variedade de disciplinas (como nas ciências atmosféricas e geociências). Estas medidas são principalmente utilizadas na adaptação de modelos (seleção ótima dos parâmetros de um determinado modelo), na validação de modelos, na seleção de modelos, na comparação de modelos (entre vários modelos concorrentes) e na avaliação de previsões (Al-Ghezi *et al.*, 2022; Hodson, 2022; McKenna *et al.*, 2015).

Para a validação deste estudo utilizou-se a fórmula seguinte que foi adotada dos modelos MAE e RMSE ao calcular o erro percentual médio entre valores simulados (Sim_i) e os medidos ($Meas_i$), normalizado pela diferença entre o valor máximo e mínimo medido.

$$Média do Erro percentual (\%) = \frac{100\%}{n} \times \sum_{i=1}^n \left| \frac{Sim_i - Meas_i}{Meas_{max} - Meas_{min}} \right| \quad (15)$$

Em que:

Sim_i – são os valores simulados

$Meas_i$ – são os Valores medidos

n- é o numero de medições realizadas

As Tabelas 34, 35, 36 e 37 apresentam os valores simulados e medidos com os 2 equipamentos de medição usados no estudo de caso o piranómetro de termopilha (Pyra) e do silício (Sky). O diferencial da média do erro percentual foi calculado para os dois equipamentos.

Tabela 34: O diferencial da média do erro percentual foi calculado para os dois equipamentos de medição (piranômetros)(PC1)

PC1					
Hora	Simulado	Medido Sky	Medido Pyra	Diferencial Sky (%)	Diferencial Pyra(%)
9h30-9h40	28,1	30,50	27		
11h30-11h40	38,8	36,80	39,2		
13h30-13h40	26,3	32,00	24,2		
15h30-15h40	38,7	38,00	36		
17h30-17h40	10,1	14,80	10,9		
				13,36	5,02

Tabela 35: O diferencial da média do erro percentual foi calculado para os dois equipamentos de medição (piranômetros)(PC2)

PC2					
Hora	Simulado	Medido Sky	Medido Pyra	Diferencial Sky (%)	Diferencial Pyra(%)
9h50-10h00	66,4	61,9	62,3		
11h50-12h00	466,99	383,3	445,9		
13h50-14h00	324,9	140,2	165,7		
15h50-16h00	76,97	56,5	46,4		
17h50-18h00	7,11	5,7	0,23		
				15,61	9,96

Tabela 36: O diferencial da média do erro percentual foi calculado para os dois equipamentos de medição (piranômetros)(PC3)

PC3					
Hora	Simulado	Medido Sky	Medido Pyra	Diferencial Sky (%)	Diferencial Pyra(%)
10h10-10h20	67	76,3	70,1		
12h10-12h20	448,05	660,9	627,5		
14h10-14h20	561,91	675,2	533,6		
16h10-16h20	35,02	36,4	33,5		
18h10-18h20	1,52	1,35	0		
				10,00	6,82

Tabela 37: O diferencial da média do erro percentual foi calculado para os dois equipamentos de medição (piranômetros)(PC4)

PC4					
Hora	Simulado	Medido Sky	Medido Pyra	Diferencial Sky (%)	Diferencial Pyra(%)
10h30-10h40	550,01	626	586,1		
12h30-12h40	741,18	767,2	717,1		
14h30-14h40	528,08	523,2	454,7		
16h30-16h40	40,68	32,7	29,3		
18h30-18h40	0	0	0		
				2,99	4,04

O erro percentual médio entre valores (simulados (Sim_i) e os medidos (Meas_i), na maioria dos PC é inferior a 10%. A maioria das medições efetuadas nos diferentes pontos de medição (PC) na hora de maior radiação, isto é, hora do almoço (entre as 12.00 e às 14.30) apresentam sempre valores muito divergentes em relação às restantes horas de medição e esse comportamento ocorre em todos os pontos de medição. Este fenómeno poderá ser explicado com as flutuações que o equipamento de medição tem perante a temperatura ambiente (Oliveira *et al.*, 2024).

Os piranómetros fotovoltaicos de silício apresentam uma seletividade espectral da resposta das células, isto é, a resposta não é sensível em todo o espectro solar e não é uniforme em toda a banda de sensibilidade (Zanenco, 1991), podendo assim ser explicado os diferentes resultados ao longo do dia e nos 4 pontos de medição, com orientações solares diferentes.

Neste caso em particular, tentou-se especificar o mais próximo da realidade que foi observada, as características da edificação do estudo de caso, das vias rodoviárias e do edificado envolvente. Este procedimento foi necessário para a obtenção e do valor de Albedo.

O fator de Albedo pode ser definido como a medida da quantidade de radiação solar refletida por um corpo ou uma superfície, calculado de acordo com o comprimento de onda da radiação solar, ou seja, a razão entre a quantidade de radiação que é refletida de volta para o espaço e a quantidade de radiação absorvida pela superfície.

O valor de Albedo é um número compreendido entre 0 e 1 para a fração da radiação solar incidente absorvida pelo material e uma das formas mais eficientes de se conseguir um valor que funcione, recorrendo à cor do material e ao tipo de material de superfície.

Há sempre uma aproximação e percentagem de erro que terão de ser tidos em conta. Por exemplo, no que diz respeito à fração da radiação solar incidente absorvida pela matéria, em vez de ser o usado o valor por definição (0,70) do software de simulação atribuiu-se valores a partir da cor do material.

A Tabela 38 apresenta os valores usados no estudo de caso. Neste caso específico, esta alteração permitiu simular a medida de refletividade específica das superfícies.

Tabela 38: Valores de Albedo do estudo de caso

Intervalo de cores de superfície do edificado	Valor de Albedo (0.0 – 1,00)
Superfície branca pouco rugosa	0.25 – 0.40
Superfície cinzenta clara a escura	0.40 – 0.50
Superfície verde, vermelha e castanha	0.50 – 0.70
Superfície castanha a azul	0.70 – 0.80
Superfície azul escura a preta	0.80 – 0.90
Quando estamos na presença de materiais à vista:	Valor de Albedo (0.0 – 1,00)
Granito cinzento	0.55 – 0.62
Tijolo vermelho	0.68
Betão	0.60
Quando estamos na presença de arborização:	Valor de Albedo (0.0 – 1,00)
Árvores com um índice de absorção de radiação alto	0.15 - 0.85

Como foi possível averiguar na Tabela 38, os valores de Albedo ainda têm uma variação grande e é um dos fatores que altera os valores de radiação simulados e a Figura 51 apresenta os valores de Albedo usados no estudo de caso.

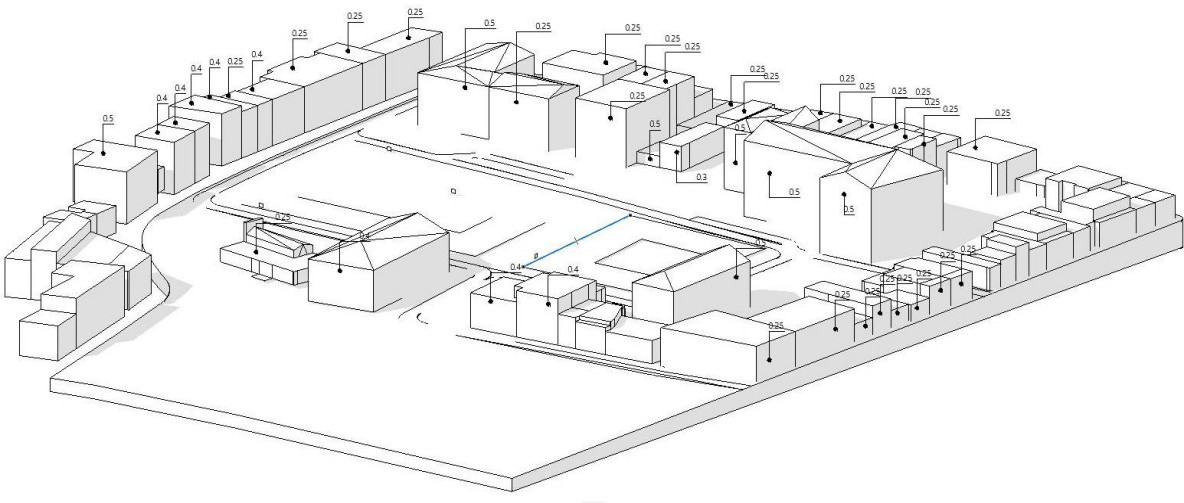


Figura 51: Ilustração dos valores de albedo usados no estudo de caso

Houve a necessidade de considerar as árvores em frente ao PC1, que têm uma orientação Norte-Poente. O erro percentual médio entre valores é superior a 13%, o que poderá ser explicado por um desvio dos valores simulados pelo carácter heterogéneo da vegetação (Figura 52).

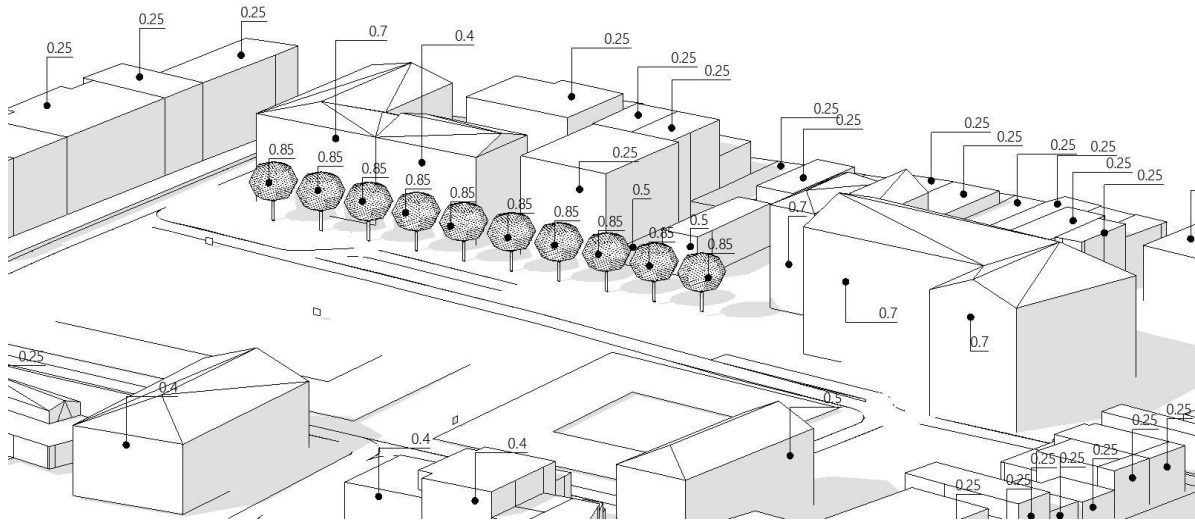


Figura 52: Ilustração dos valores de albedo usados no PC1 do estudo de caso

Assim, numa fachada a norte-poente os valores da radiação direta são menores, porque quanto mais a norte menos acesso a fachada tem a radiação solar. Sendo os valores do PC1 obtidos numa fachada a norte-poente e a radiação global simulada acumulativa. À medida que se avança na hora de maior radiação, como a hora do meio-dia solar, maior será a influencia percentual dos valores de reflexão do solo e da envolvente quando comparados com a radiação direta ou mesmo difusa.

No PC2, localizado no interior do pátio e com a orientação a sul, os valores medidos com o Piranómetro de silício apresentam maior diferença em relação aos valores simulados do que com o Piranómetro de termopilha. Pelas horas em que ocorre a maior diferença, tal facto pode-se dever a uma maior sensibilidade deste equipamento ou da simulação à radiação direta.

O PC3 é a poente, onde se nota claramente que ao longo do dia aumenta a radiação. Na hora do almoço os maiores valores de radiação podem ser explicados pela refletividade da envolvente que se soma à radiação direta. A radiação difusa é mais difícil de simular, pois provém sobretudo dos valores disponibilizados pelo ficheiro climático EPW e sobretudo nas horas do final da tarde, quando o software tem mais dificuldades em se aproximar dos valores medidos. Os dados que o software

necessita para efetuar a simulação dinâmica são: a temperatura de bolbo seco, humidade relativa, radiação difusa horizontal e direta normal, velocidade e direção do vento. Estes são representativos das condições meteorológicas durante os ensaios, excetuando os dados da radiação. Sobre todos os outros dados medidos durante os ensaios foram efetuadas médias horárias e posteriormente foram inseridos no ficheiro climático de base.

Relativamente à radiação, foi necessário calcular os valores horários da radiação difusa horizontal e direta normal a partir da radiação global horizontal medida. A metodologia de cálculo associado à obtenção destes valores de radiação será descrita no Anexo III. Para finalizar o ficheiro climático a utilizar durante as simulações, os dados de radiação calculados foram inseridos no ficheiro climático de base.

5.4 Análise de sensibilidade

As medições efetuadas in situ no estudo de caso e as simulações efetuadas a partir dos dados das medições, permitiram concluir que a forma urbana com pátio (baseada na forma urbana 1 do estudo preliminar) é a forma que possibilita mais sombreamento acústico, por ter o pátio interior que permite essa redução de ruído perante a exposição das vias de tráfego automóvel circundantes.

No estudo preliminar apresentado detetou-se que é a forma urbana 1 que promove mais sombreamento solar, pois o pátio com as envolventes projeta sombra ou cria sombra. Como foi referido anteriormente, o sombreamento solar deve ser evitado ou reduzido, pois o objetivo das soluções ótimas e sustentáveis na edificação é obter a maior exposição solar que for possível.

Nesse sentido, apresenta-se uma análise de sensibilidade a partir da criação de cinco formas urbanas baseadas nas formas urbanas originais, com aumentos de área de pátio e extensão de fachadas de forma a ser possível averiguar quais as fachadas com mais exposição à radiação solar e ao ruído e avaliar a situação de compromisso.

A análise manteve a envolvente próxima às formas urbanas em estudo nas mesmas condições, nomeadamente, o edificado e a estrutura viária. Os limites da área de implantação mantiveram-se os mesmos e houve uma simplificação do estudo de caso original, fechando aberturas ou acessos pedonais de forma a criar uma estrutura compacta e sólida em termos de continuidade de fachadas.

Para a avaliação dos níveis de ruído nas fachadas, foi utilizado o método de previsão de ruído CNOSSOS-EU, recomendado pela Diretiva (UE) 2015/996 da Comissão, de 19 de maio de 2015, atualizada pela Diretiva Delegada (UE) 2021/1226 da Comissão, de 21 de dezembro 2020 (DIRETIVA DELEGADA (UE) 2021/1226 DA COMISSÃO que altera, para efeitos de adaptação ao progresso científico e técnico, o anexo II da Diretiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho no respeitante aos métodos comuns de avaliação do ruído, 2021).

Os indicadores de ruído utilizados na elaboração destes estudos foi o nível sonoro contínuo equivalente, apresentado na escala de ponderação A para o período de dia (Ld) por ser o indicador de ruído $Leq(A)$ correspondente ao período diurno. Foi considerada a média energética do ruído por ser uma medida logarítmica e desta forma ser a mais adequada ao cálculo da média energética do ruído que chega à fachada do edifício.

Desenvolveu-se uma grelha quadrangular de cálculo, ao longo de todas as fachadas com uma dimensão de aproximadamente 3 m x 3 m e um afastamento à fachada de 0,5 m. O número de pisos exposto ao ruído é de 4 pisos e com um pé direito de aproximadamente 3m, rés-do-chão ligeiramente diferente devido à topografia, mantendo a cota dos edifícios iguais.

O cálculo das simulações do ruído nas fachadas teve como condições de via, as mesmas usadas na validação do estudo de caso, isto é, um pavimento asfáltico betuminoso normal com 0% de inclinação. O tráfego automóvel considerado tem um fluxo do tráfego rodoviário fluído e um fluxo total de tráfego horário de 116 veículos/h com 0% de pesados; considerando uma velocidade de circulação de 50 km/h (ruas de sentido único e do centro histórico, com pouca capacidade para albergar a circulação de veículos pesados)

Os estudos da radiação solar incidiram na irradiação como sendo a quantidade de energia radiante que incide numa superfície durante um certo intervalo de tempo, por unidade de área desta. No caso de estudo, a irradiância (como sendo o valor instantâneo da radiação solar incidente em W/m^2) calculada num intervalo de tempo, foi para o pior cenário, neste caso para o dia mais pequeno do ano, isto é o dia do Solstício de Inverno (21 de dezembro). Este dia, no hemisfério Norte, é o que apresenta menor incidência de radiação solar e menor exposição em horas. O sol neste dia de solstício estará o mais baixo possível no céu e, aquando da sua passagem meridiana atingirá a altura mínima (aproximadamente entre 25 e 30° dependendo da latitude do lugar em Portugal continental). A unidade de medida é dada em Wh/m^2 e a irradiação diária pode ser em $Wh/m^2.dia$.

Para os diferentes cenários e formas urbanas desenvolveu-se uma grelha quadrangular de cálculo, similar à utilizada no ruído, ao longo de todas as fachadas com uma dimensão de aproximadamente 3m x 3m (na altura é variável no R/C e exatamente 3m a partir do 1º andar, mas no comprimento é

variável dependendo do comprimento total da fachada porque não são múltiplos exatos de 3m). O número de pisos exposto à radiação é de 4 pisos. De forma a obter uma análise comparativa, para além da manutenção das cotas do edificado, manteve-se a mesma envolvente (edificado e estrutura viária) e os limites do edificado do estudo de caso foram mantidos de forma que as variações apresentadas não apresentem muitas diferenças em relação à forma urbana original.

5.4.1 Análise de Variações de Forma

As próximas figuras apresentadas, são variações do estudo de caso original e inclusive a original foi simplificada e colocada de forma a privilegiar a orientação totalmente a sul, a totalidade do estudo de caso foi rodado (aproximadamente 45°) de modo que as formas urbanas em estudo estejam sempre na relação norte - sul.

5.4.1.1 Análise de Variação A

A Forma original na variação A representa o modelo compacto do original e é apresentada com todas as fachadas nomeadas usando a orientação solar e posicionamento em relação à rua como referência para facilitar a leitura e comparação e é representada na Figura 53.

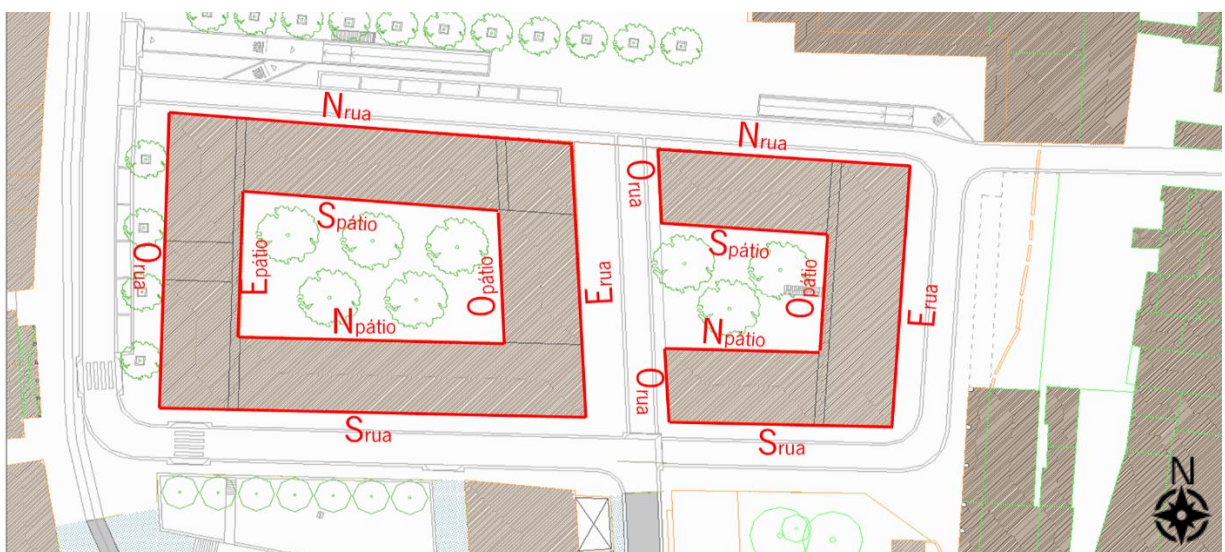


Figura 53: Forma original variação A

A Tabela 39 representa os níveis de ruído que chegam a cada uma das fachadas. Por forma a ter uma leitura mais completa, para além da média energética, calculou-se o valor mínimo (32,0 dB(A)) e o valor máximo (62,7dB(A)) de exposição ao ruído, onde é possível verificar que as fachadas no interior dos pátios (totalmente ou semiabertos) são as que detêm níveis de ruído menores.

Sobretudo as fachadas completamente bloqueadas à fonte de ruído: Epátio, Spátio, Opátio e a Npátio, os níveis de ruído médios variam entre 32,9-38,7 dB(A), comparativamente às fachadas com maior exposição (com total ângulo de visão da fonte de ruído), nomeadamente as S_{rua} e as N_{rua}, por serem fachadas que estão expostas diretamente à fonte de maior ruído, a via de tráfego automóvel circundante.

Tabela 39: Forma original variação A (análise de ruído)

Fachadas	Orientação	Média energética por fachada (dB(A))	Mínimo por fachada (dB(A))	Máximo por fachada (dB(A))
O _{rua}	Poente	57,1	56,0	59,2
E _{pátio}	Nascente	32,9	32,5	33,4
N _{rua}	Norte	59,9	57,1	62,4
S _{pátio}	Sul	32,9	32,4	33,5
E _{Rua}	Nascente	51,7	47,3	57,3
O _{pátio}	Poente	32,3	32,0	32,8
S _{rua}	Sul	58,9	56,6	60,8
N _{pátio}	Norte	32,9	32,4	33,4
O _{rua}	Poente	53,1	49,9	56,4
N _{rua}	Norte	59,4	56,9	62,7
S _{pátio}	Sul	38,9	33,0	42,9
E _{rua}	Nascente	58,2	55,5	61,4
O _{pátio}	Poente	33,3	32,8	33,8
S _{rua}	Sul	58,5	55,7	60,2
N _{pátio}	Norte	38,7	33,0	42,5
O _{rua}	Poente	53,2	50,1	56,4

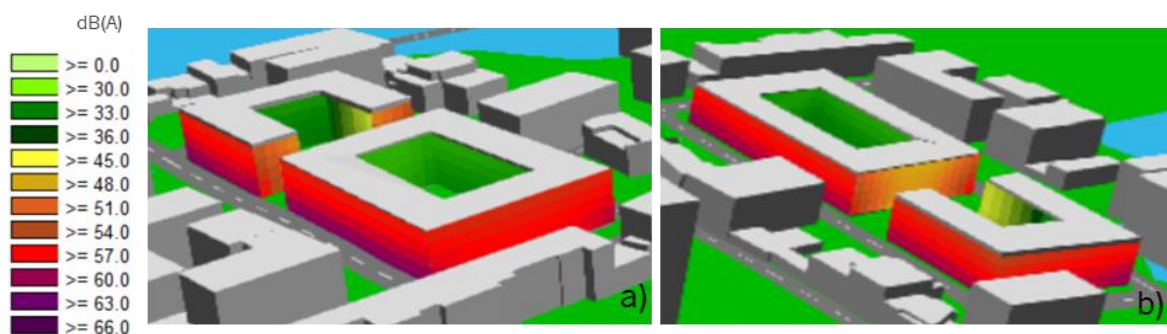


Figura 54: Níveis de ruído na fachada a) orientação N-O b) orientação S-E

Como é possível observar a figura anterior representa bem o contraste das fachadas no interior do pátio e no exterior do mesmo. A oscilação de valores entre o interior e o exterior do pátio a sul situa-se na grandeza de 26,0 dB(A) (S_{rua} (58,9) – $S_{pátio}$ (32,9)) e de 19,6 dB (S_{rua} (58,5) – $S_{pátio}$ (38,9)), a norte situa-se na grandeza de 27,0 dB (N_{rua} (59,9) – $N_{pátio}$ (32,9)) e de 20,7 dB (N_{rua} (59,4) – $N_{pátio}$ (38,7)). É um diferencial enorme em termos de exposição ao ruído, mas espetável, dado que o edifício funciona como uma barreira acústica. Em termos de radiação solar para as mesmas fachadas o diferencial também é grande, mas neste caso o obstáculo à radiação solar é uma desvantagem e não uma vantagem como na exposição ao ruído, onde normalmente uma barreira ou obstáculo é sinónimo de promoção de sombra acústica.

Tabela 40: Forma original variação A (análise de radiação)

Fachadas	Orientação	Média aritmética por fachada (kWh/m ²)	Mínimo por fachada (kWh/m ²)	Máximo por fachada (kWh/m ²)
O _{rua}	Poente	0,71	0,52	1,00
E _{pátio}	Nascente	0,68	0,21	1,66
N _{rua}	Norte	0,15	0,05	0,25
S _{pátio}	Sul	2,40	0,89	4,24
E _{rua}	Nascente	1,10	0,54	1,54
O _{pátio}	Poente	0,53	0,20	1,14
S _{rua}	Sul	3,50	0,62	4,35
N _{pátio}	Norte	0,31	0,20	0,41
O _{rua}	Poente	0,71	0,53	0,96
N _{rua}	Norte	0,15	0,04	0,26
S _{pátio}	Sul	2,26	0,36	4,23
E _{rua}	Nascente	1,23	0,58	1,80
O _{pátio}	Poente	0,45	0,23	0,94
S _{rua}	Sul	3,73	2,42	4,33
N _{pátio}	Norte	0,31	0,20	0,39
O _{rua}	Poente	0,84	0,64	1,13

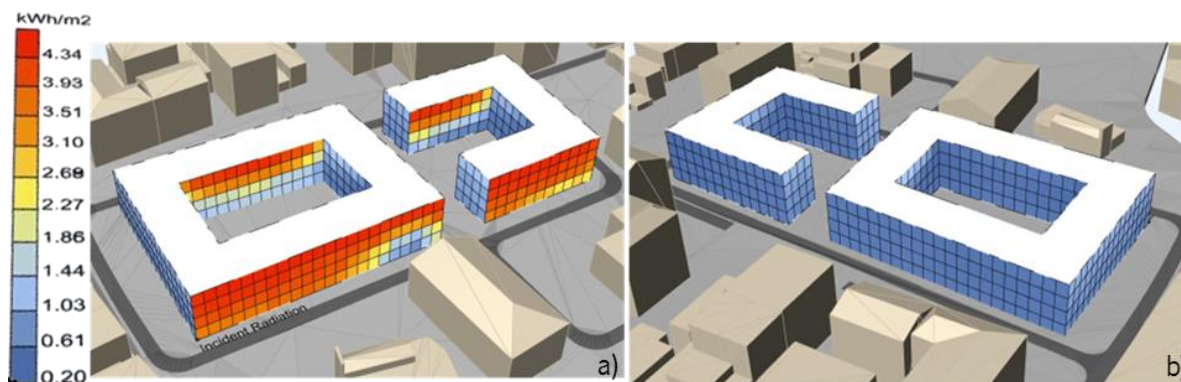


Figura 55: Radiação na fachada a) orientação O-S b) orientação O-N

A Figura 55 ilustra claramente que as fachadas a sul (imagem à esquerda) são as que mais beneficiam de exposição solar, se não houver obstáculos à sua propagação ou se de forma natural, como as fachadas orientadas a norte não recebem radiação direta (imagem à direita), os seus valores são próximos de zero. Como o cálculo apresentado é de radiação solar global (radiação direta + difusa + refletida) os valores a norte não são totalmente zero.

A variação A tem incorporado o formato ótimo em termos de sombreamento acústico, o pátio interior fechado. As restantes variações de forma tiveram também origem na forma do estudo de caso e resultaram da necessidade de ser representativas de outras formas urbanas otimizadas. Esta premissa é parte do objetivo de estudo, isto é, avaliar o compromisso a partir da perspetiva do sombreamento acústico, sem promover o sombreamento solar. O compromisso pretendido com o estudo vem representado nas análises e nos gráficos seguintes.

O gráfico da variação A, estabelece a ligação de radiação solar e exposição ao ruído por fachada e, assim, permitir avaliar por fachada se é um compromisso solar-acústico ou se é uma otimização solar ou otimização acústica ou nenhuma das anteriores. O compromisso ideal seria não ter que ceder em nenhuma das componentes. As análises seguintes permitirão analisar a relação da forma e do sombreamento solar-acústico com vista à variação mais sustentável.

Em termos práticos, o princípio da análise parte sempre das fachadas com níveis de ruído mais baixos, neste caso, são as fachadas: Epátio, Npátio, Spátio e as Opátio, que usamos como ponto de partida para averiguar as fachadas com maior radiação solar, mas que sejam coincidentes com as fachadas

de menor exposição ao ruído. Neste caso, são as fachadas $S_{\text{pátio}}$ que têm um melhor desempenho, em especial a $S_{\text{pátio interior}}$ (1212,1 kWh) que em termos de fachada ideal ou de compromisso esta seria uma boa opção, como é possível ver no gráfico da Figura 56.

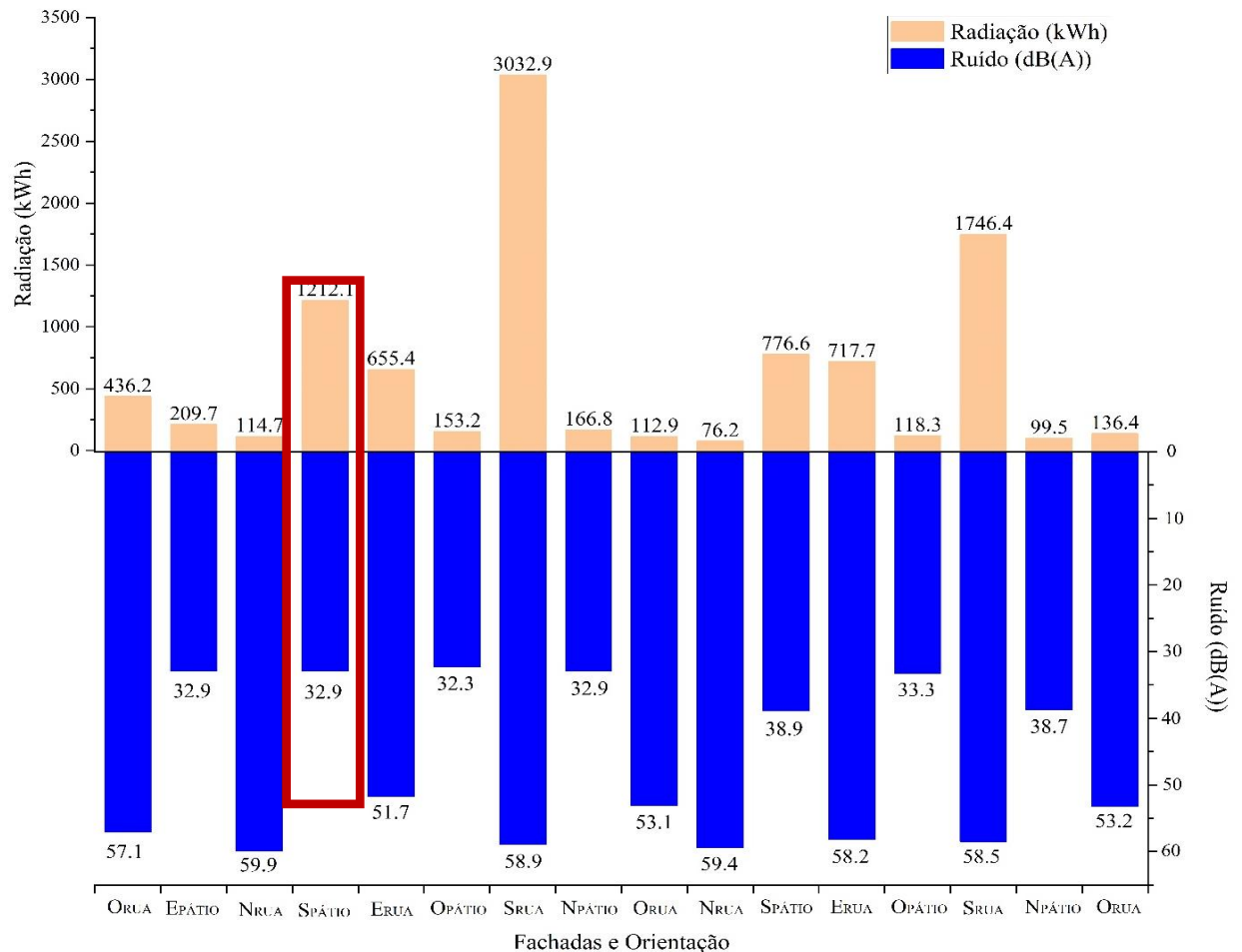


Figura 56: Análise comparativa entre ruído e radiação por fachada: Variação A

Como era expectável e as Tabelas 39 e 40 e o gráfico (Figura 56) anterior assim o demonstram, as situações ideais seriam sempre na orientação a sul e dentro de pátios para cumprir ambas as solicitações de otimização. À medida que o pátio se vai abrindo a exposição ao ruído também aumenta e como foi possível verificar, a exposição solar ($S_{\text{pátio menos interior}}$ (776,6 kWh)) também diminui por ter uma área de exposição solar menor relativamente à anterior.

5.4.1.2 Análise de Variação B

A Figura 57 representa a Variação B que é a junção das duas formas urbanas que compõem a forma original. Nesta Variação preconizou-se o aumento do pátio interior no comprimento maior do conjunto e analisou-se essa relação de pátio totalmente fechado, implicando fachadas interiores com uma maior extensão de área.

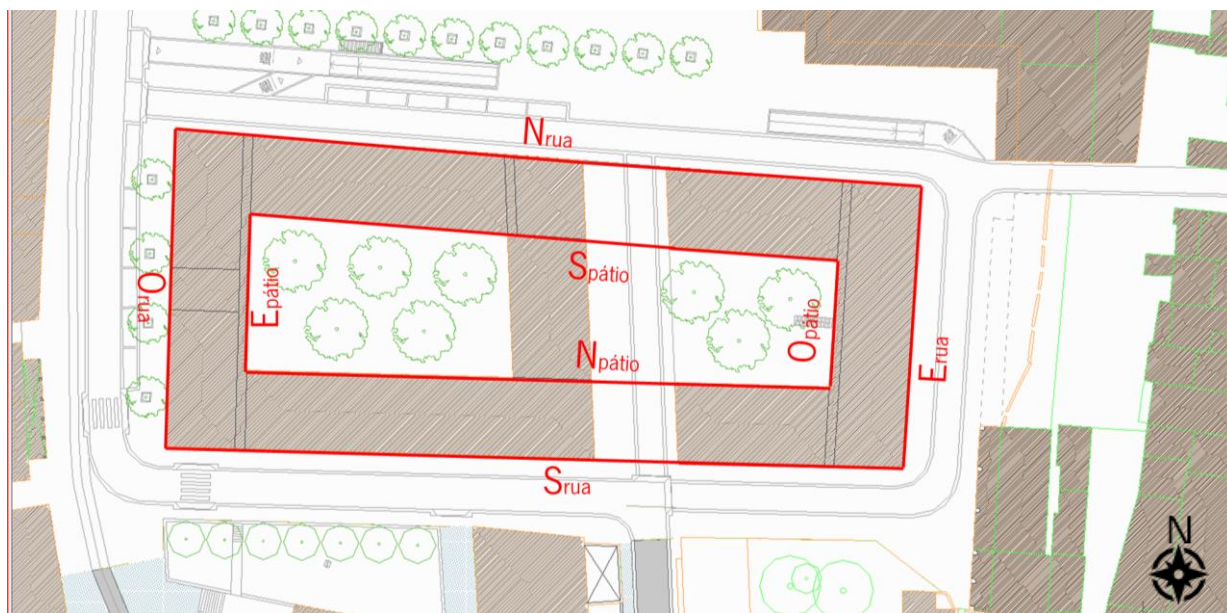


Figura 57: Forma original variação B

O aumento de área de fachada no interior do pátio, nomeadamente as fachadas $S_{pátio}$ e $N_{pátio}$ resultou num aumento de área protegida ao ruído, no entanto, o nível médio de ruído nestas fachadas não registou alterações. Se considerarmos as fachadas $S_{pátio}$, nas duas variações (A e B) no interior fechado do pátio há um aumento de 57% de área de fachada. O nível de ruído médio (32,9 d(B)), do conjunto de fachadas da variação B apresenta o mesmo valor médio que a variação A.

Podemos então afirmar que a Variação B obteve um aumento de fachada calma de 57%. Por outro lado, esta Variação registou um aumento de fachada mais ruidosa (exposta diretamente à fonte de ruído) de aproximadamente 10%, este aumento de área mais exposta (nas fachadas S_{Rua} e N_{Rua}) apresentou-se, no entanto, mais ligeiro do que o registado na fachada calma devido à configuração das duas Variações A e B. O valor mínimo foi registado nas fachadas interiores e o valor máximo na fachada Norte exposta diretamente à fonte N_{Rua} como é possível analisar na Tabela 41.

Tabela 41: Forma original variação B (análise de ruído)

Fachadas	Orientação	Média energética por fachada (dB(A))	Mínimo por fachada (dB(A))	Máximo por fachada (dB(A))
O _{rua}	Poente	57,1	56	59,2
E _{pátio}	Nascente	32,9	32,5	33,4
N _{rua}	Norte	58,7	56,6	62,3
S _{pátio}	Sul	32,9	32,2	33,8
S _{Rua}	Sul	58,7	55,5	60,8
N _{pátio}	Norte	32,9	32,4	33,7
E _{rua}	Nascente	57,3	38,4	61,4
O _{pátio}	Poente	33,3	32,8	33,8

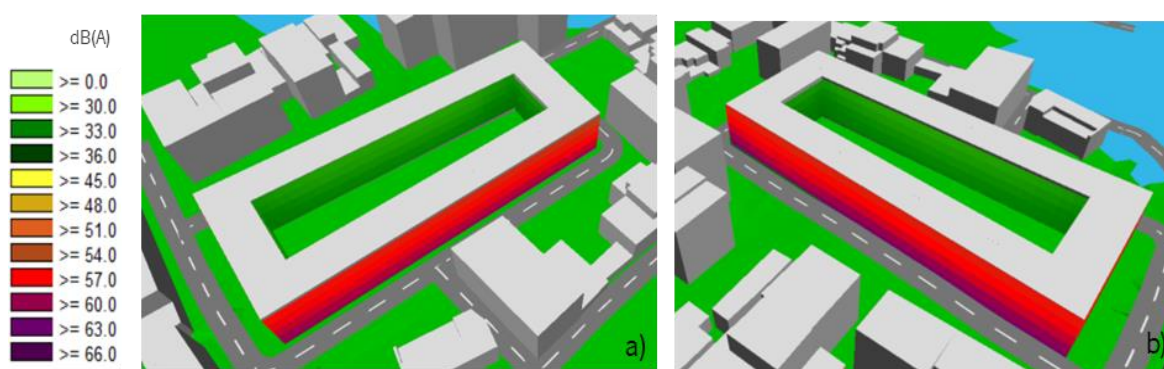


Figura 58: Níveis de ruído na fachada a) orientação O-S b) orientação E-N

Como é possível observar na Figura 58, o efeito de barreira proporcionado pelo edifício é assinalável. O diferencial do nível médio de ruído obtido nas fachadas no interior do pátio e no exterior do mesmo são de 25,8 dB ($(N_{rua} (58,70) - N_{pátio} (32,90))$ ou $(S_{rua} (58,70) - S_{pátio} (32,90))$). É uma redução do diferencial relativamente aos valores da Variação A (27,0 dB, como referência máxima de diferencial), no entanto, continua a ser uma grandeza de valores a considerar em termos de exposição ao ruído.

O aumento da área de fachada da Variação B vai proporcionar uma maior área de exposição à radiação solar sobretudo na fachada $S_{pátio}$. Neste caso, a redução do obstáculo (laterais do edificado) à radiação solar é uma vantagem, o aumento de área de fachada $S_{pátio}$, relativamente à variação A, aumentou aproximadamente 0,2 kWh/m² (2,59 – 2,40) em termos de exposição solar.

Tabela 42: Forma original variação B (análise de radiação)

Fachadas	Orientação	Média aritmética por fachada (kWh/m ²)	Mínimo por fachada (kWh/m ²)	Máximo por fachada (kWh/m ²)
O _{rua}	Poente	0,71	0,52	1,00
E _{pátio}	Nascente	0,69	0,23	1,65
N _{rua}	Norte	0,37	0,34	0,45
S _{pátio}	Sul	2,59	0,63	4,26
S _{Rua}	Sul	2,67	0,66	4,27
N _{pátio}	Norte	0,34	0,20	0,42
E _{rua}	Nascente	1,23	0,58	1,80
O _{pátio}	Poente	0,46	0,26	0,94

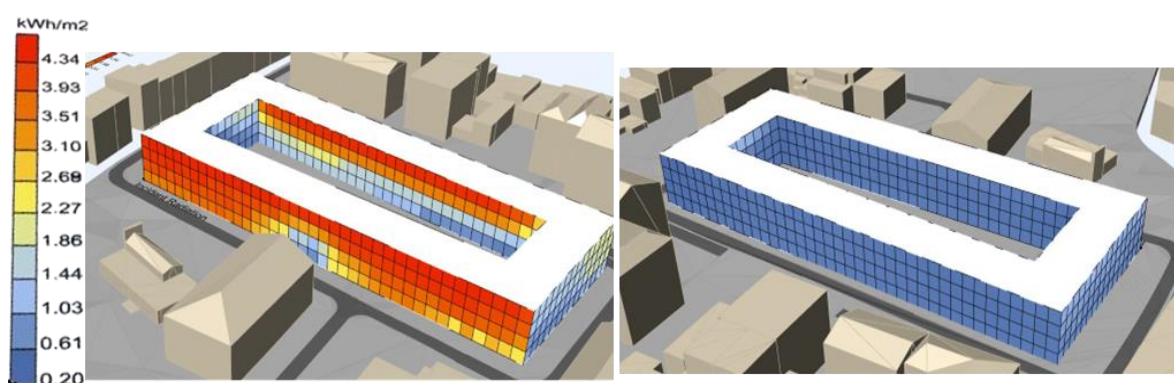


Figura 59: Radiação na fachada a) orientação O-S b) orientação O-N

A Figura 59 representa claramente que o aumento de área das fachadas a sul (primeira imagem) são as que mais beneficiam de exposição solar. A fachada S_{Rua} têm sempre a envolvente próxima que cria uma ligeira sombra na fachada e a fachada S_{pátio} tem sempre as laterais do próprio edificado a criar alguma sombra também.

Em termos médios não há uma grande diferença nos valores das duas fachadas, pois ambas tem obstáculos à exposição solar. De forma expectável, as fachadas orientadas a norte continuam a não receberem radiação direta (segunda imagem), logo os seus valores continuam próximos de zero.

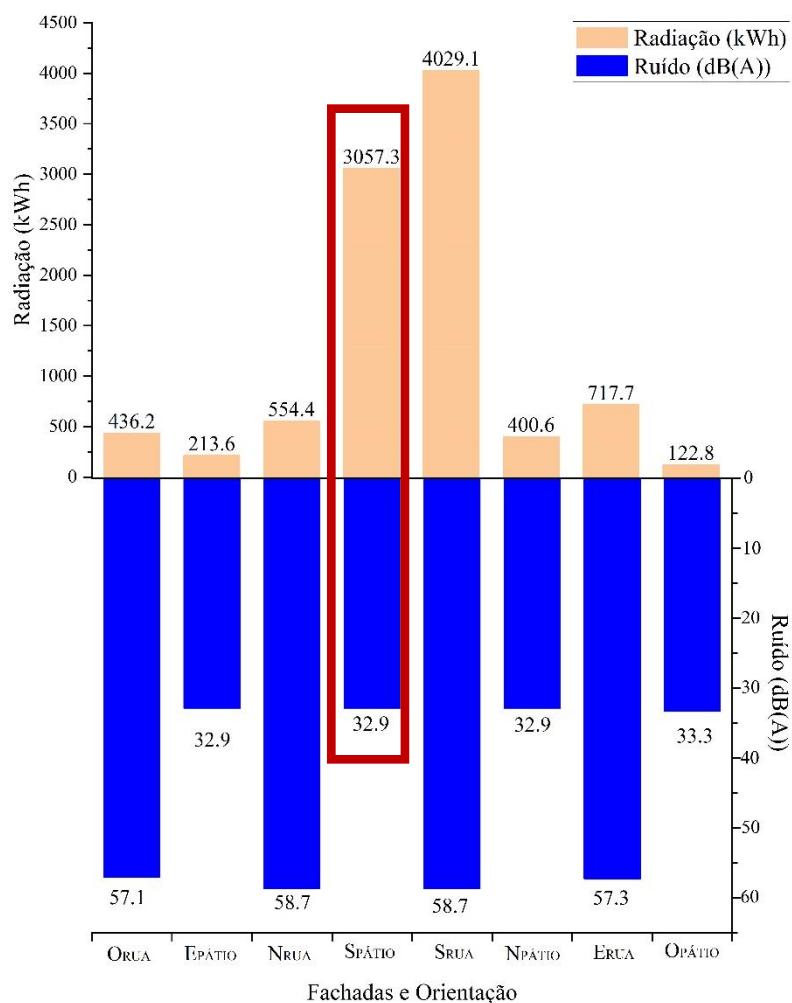


Figura 60: Análise comparativa entre ruído e radiação por fachada: Variação B

Partindo das fachadas com menor exposição ao ruído (média energética representativa do ruído que chega à fachada) temos as Epátio, Npátio, Spátio e as Opátio, mas em termos de radiação só as Spátio que têm um melhor desempenho, em especial a Spátio (3057,3 kWh) que é a que tem uma exposição elevada à radiação solar (nomeadamente em termos absolutos de radiação que chega à fachada e não por m²).

Em termos de fachada ideal ou de compromisso, a variação B, seria uma boa opção, como foi possível ver no gráfico da Figura 60.

5.4.1.3 Análise de Variação C

A proposta da variação C vem no seguimento do raciocínio anterior, mas com o intuito de eliminar a envolvente próxima que crie sombra lateral de forma a comparar as duas fachadas a sul com menos obstáculos (nomeadamente as fachadas $S_{\text{pátio}}$ e S_{rua}).

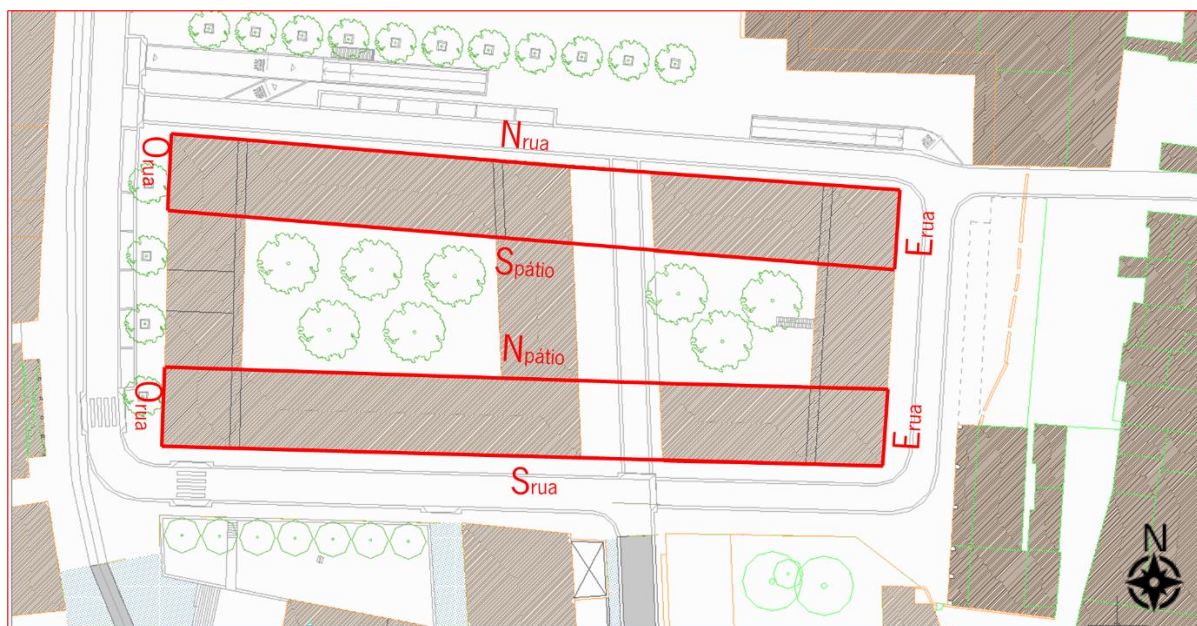


Figura 61: Forma original variação C

Os níveis de ruído que chegam às novas fachadas, com a proposta da Variação C, espera-se que aumentem, pois o pátio fechado foi eliminado. Efetivamente, com as aberturas laterais, a propagação do ruído aumenta e, com maior extensão de área contínua aumenta a exposição ao ruído. Os valores da tabela seguinte são representativos desse aumento de valores nas fachadas, sobretudo na $S_{\text{pátio}}$ e na $N_{\text{pátio}}$

Houve um aumento de valores do valor médio, relativamente à Variação B na ordem dos 14,4 dB(A) da fachada $S_{\text{pátio}}$ (47,3-32,9 d(B)). As fachadas que não pertenciam ao pátio não sofreram grandes alterações na exposição ao ruído em termos de valor médio, contudo a área de exposição direta ao ruído das fachadas desta forma é superior, por deixarem de existir fachadas de pátio interior.

Tabela 43: Forma original variação C (análise de ruído)

Fachadas	Orientação	Média energética por fachada (dB(A))	Mínimo por fachada (dB(A))	Máximo por fachada (dB(A))
O _{rua}	Poente	57,4	56,4	58,8
N _{rua}	Norte	59,5	56,6	62,3
S _{pátio}	Sul	47,3	35,8	54,6
E _{Rua}	Nascente	56,9	61,5	56,9
E _{Rua}	Nascente	57,5	55,5	58,8
S _{rua}	Sul	58,7	55,5	60,7
N _{pátio}	Norte	47,9	37	55,1
O _{rua}	Poente	57,6	56,4	59,1

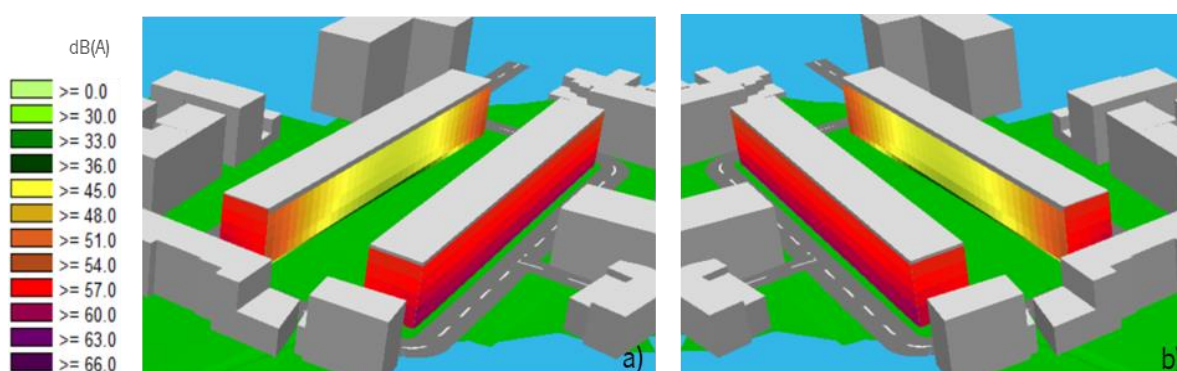


Figura 62: Níveis de ruído na fachada a) orientação O-S b) orientação S-E

Como é possível observar na Figura 62 o diferencial do valor médio do nível de ruído das fachadas interior (sem pátio) e no exterior do edificado é menos significativo, resultando um valor de 11,4 dB(A) (S_{rua} (58,7) – $S_{pátio}$ (47,3)). É uma redução do diferencial relativamente aos valores da Variação B, no entanto, continua a ser uma grandeza de valores a considerar em termos de exposição ao ruído.

O aumento da área de fachada da Variação C, sem obstáculos laterais, vai proporcionar uma maior exposição à radiação solar para as mesmas fachadas. O diferencial também é elevado, mas neste caso a redução dos obstáculos laterais do edificado à radiação solar é uma vantagem e os valores da tabela seguinte representam esse aumento de exposição nas duas fachadas. O aumento é mais significativo na área de exposição a sul, que é a orientação privilegiada para a captação de radiação solar.

Tabela 44: Forma original variação C (análise de radiação)

Fachadas	Orientação	Média aritmética por fachada (kWh/m ²)	Mínimo por fachada (kWh/m ²)	Máximo por fachada (kWh/m ² m ²)
O _{rua}	Poente	0,72	0,52	0,91
N _{rua}	Norte	0,35	0,23	0,42
S _{pátio}	Sul	2,67	0,66	4,27
E _{Rua}	Nascente	0,13	0,07	0,23
E _{Rua}	Nascente	0,97	0,58	1,33
S _{rua}	Sul	3,58	0,76	4,35
N _{pátio}	Norte	0,37	0,34	0,45
O _{rua}	Poente	0,69	0,52	0,99

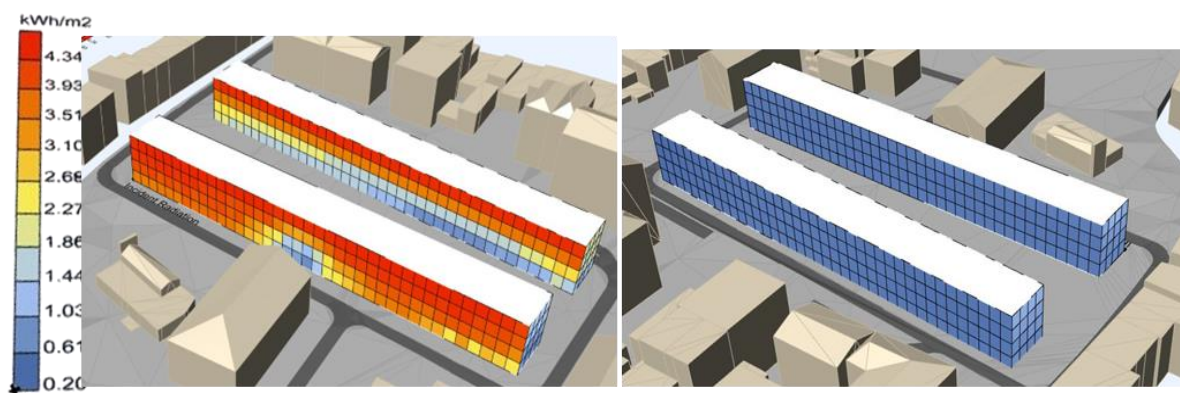


Figura 63: Radiação na fachada a) orientação S-E b) orientação N-O

Na fachada S_{pátio} esperava-se um aumento mais significativo do valor médio da radiação, mas não se esperava um aumento da fachada S_{rua}, pois não houve uma alteração que justifique o aumento do valor relativamente à Variação B. Em termos de valores máximos mantiveram-se similares à Variação B e dentro do espectável.

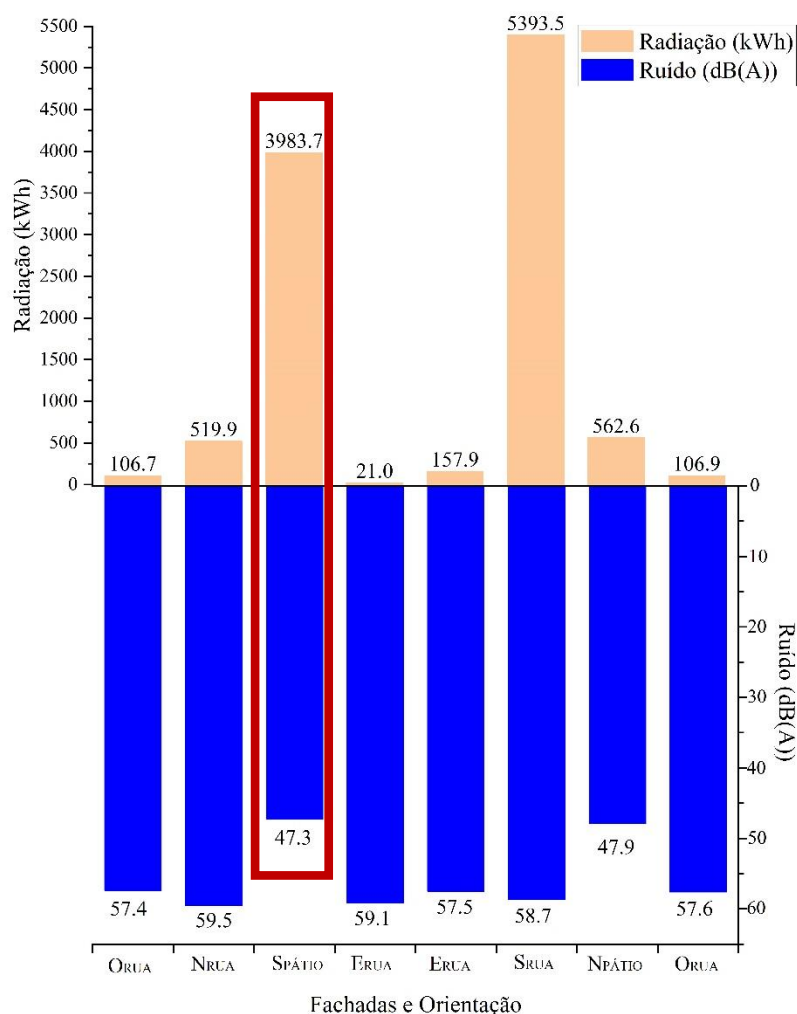


Figura 64: Análise comparativa entre ruído e radiação por fachada: Variação C

A variação C não promove zonas de sombreamento acústico nas zonas entre edifícios, verificando-se um aumento dos níveis de ruído significativo nas fachadas Spátio e Npátio, ao contrário do que acontece no modelo da variação B ou A. O aumento é explicado pelas aberturas laterais que proporcionam a propagação do ruído para as fachadas interiores desta forma. A mesma abertura proporcionou um aumento da radiação nas fachadas a sul em termos globais, como é possível verificar no gráfico anterior. A fachada Spátio continua a ser a fachada com melhor compromisso, apesar do aumento dos níveis de ruído na fachada.

5.4.1.4 Análise de Variação D

A proposta de análise da variação D vai no sentido de estudar os pátios interiores, mas com aberturas laterais de forma a perceber o impacto das mesmas em termos de exposição ao ruído. O foco manteve-se no estudo das fachadas com maior área de sombreamento acústico. Nesta proposta o acesso aos pátios é pelas mesmas aberturas laterais e o objetivo é avaliar qual o impacto que a mesma disposição tem em termos de radiação solar e de compromisso com o sombreamento acústico.

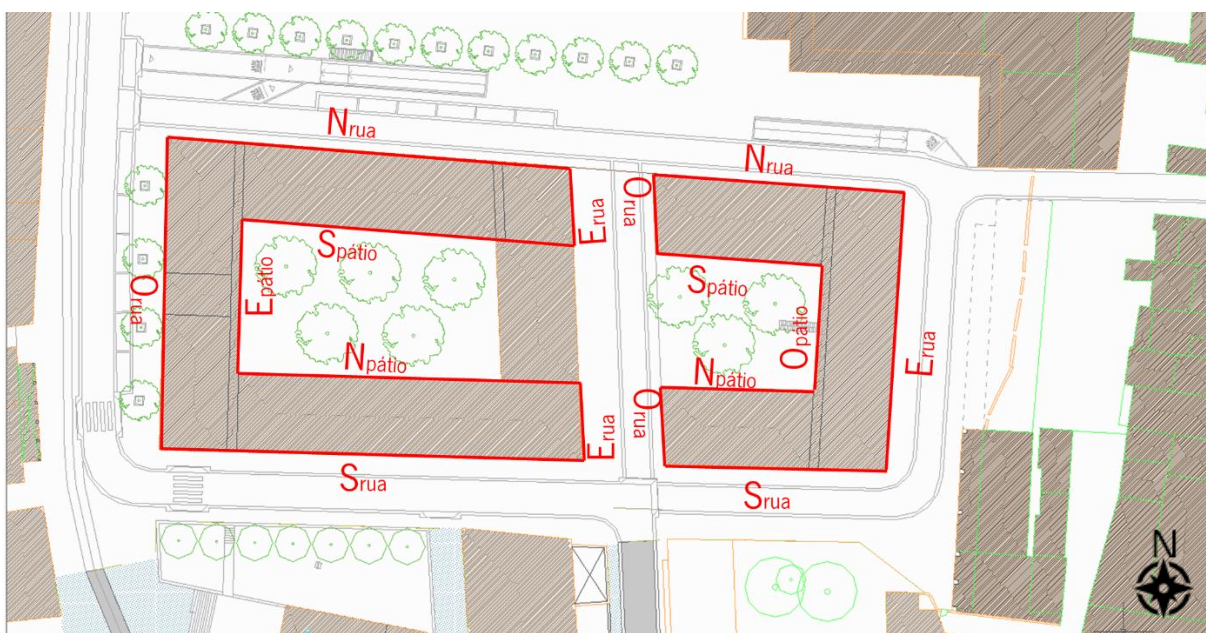


Figura 65: Forma original variação D

A Tabela 45 apresenta o nível de ruído médio que chega a cada uma das fachadas e um pouco similar ao que acontece na Variação A, são as fachadas no interior dos pátios (semiabertos agora) que estão expostas a níveis de ruído menores.

Mesmo nas fachadas $E_{pátio}$, $S_{pátio}$, $O_{pátio}$ e a $N_{pátio}$ que continuam a serem as fachadas menos ruidosas, registam um ligeiro aumento dos valores médios relativamente aos da Variação A, sobretudo na fachada $S_{pátio}$ (32,9 dB(A) (da variação A para 36,6dB(A) da variação D) e na $N_{pátio}$ (32,9 dB(A) (da variação A para 36,9dB da variação D), pois houve 20% ($S_{pátio}$) a 23% ($N_{pátio}$) de aumento de área de fachada (em ambas as fachadas), logo um aumento de área de exposição ao ruído, demonstrado na Tabela 45.

Tabela 45: Forma original variação D (análise de ruído)

Fachadas	Orientaçã o	Média energética por fachada (dB(A))	Mínimo por fachada (dB(A))	Máximo por fachada (dB(A))
O _{rua}	Poente	57,1	56,0	59,2
E _{pátio}	Nascente	32,9	32,5	33,4
N _{rua}	Norte	59,8	56,9	62,3
S _{pátio}	Sul	36,6	32,5	42,4
E _{Rua}	Nascente	53,7	50,4	57,5
E _{Rua}	Nascente	52,8	49,6	55,7
S _{rua}	Sul	58,9	56,6	60,8
N _{pátio}	Norte	36,9	32,5	42,9
O _{rua}	Poente	53,1	49,9	56,4
N _{rua}	Norte	59,4	56,9	62,7
S _{pátio}	Sul	38,8	33,1	42,9
E _{rua}	Nascente	55,5	61,4	55,5
O _{pátio}	Poente	33,3	32,8	33,8
S _{rua}	Sul	58,5	55,7	60,1
N _{pátio}	Norte	38,8	33,0	42,5
O _{rua}	Poente	53,2	50,1	56,4

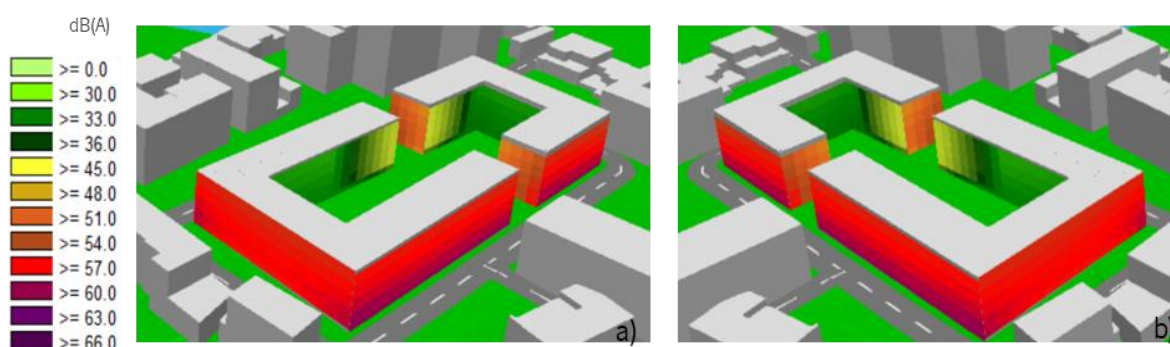


Figura 66: Radiação na fachada a) orientação S-E b) orientação N-O

Como é possível verificar na Figura 66, é na entrada das aberturas onde se evidencia o início da propagação para o interior do pátio e à medida que se distancia da via (fonte de ruído) e se aproxima do interior do pátio, observa-se a redução dos níveis de exposição ao ruído.

Em termos de radiação solar, o comportamento de recetividade é muito similar ao da Variação A, isto é, os obstáculos à radiação solar constituem uma desvantagem, mas o diferencial entre um conjunto edificado constituído por um pátio fechado e um semiaberto e um conjunto composto por dois pátios

semiabertos, em termos de exposição à radiação solar, não a representam uma grande diferença em termos numéricos.

Tabela 46: Forma original variação D (análise de radiação)

Fachadas	Orientaçã o	Média energética por fachada (kWh/m²)	Mínimo por fachada (kWh/m²)	Máximo por fachada (kWh/m²)
O _{rua}	Poente	0,71	0,52	1,00
E _{pátio}	Nascente	0,69	0,23	1,63
N _{rua}	Norte	0,15	0,05	0,25
S _{pátio}	Sul	2,72	1,01	4,28
E _{Rua}	Nascente	1,03	0,65	1,51
E _{Rua}	Nascente	1,27	1,04	1,49
S _{rua}	Sul	3,50	0,62	4,35
N _{pátio}	Norte	0,14	0,04	0,24
O _{rua}	Poente	0,89	0,61	1,17
N _{rua}	Norte	0,15	0,04	0,26
S _{pátio}	Sul	2,28	0,37	4,25
E _{rua}	Nascente	1,23	0,58	1,80
O _{pátio}	Poente	0,47	0,26	0,95
S _{rua}	Sul	3,73	2,42	4,33
N _{pátio}	Norte	0,13	0,04	0,24
O _{rua}	Poente	0,87	0,67	1,14

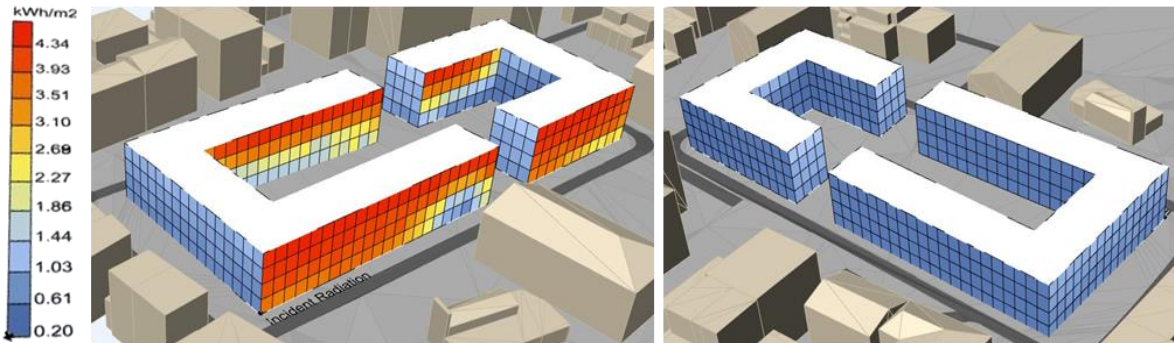


Figura 67: Radiação na fachada a) orientação O-S b) orientação N-O

A Figura 67 representa claramente que as fachadas a sul (primeira imagem) são as que mais beneficiam de exposição solar, se não houver obstáculos à sua propagação e as fachadas orientadas a norte as que não recebem radiação direta (segunda imagem), com valores próximos de zero, um pouco como acontece na Variação A.

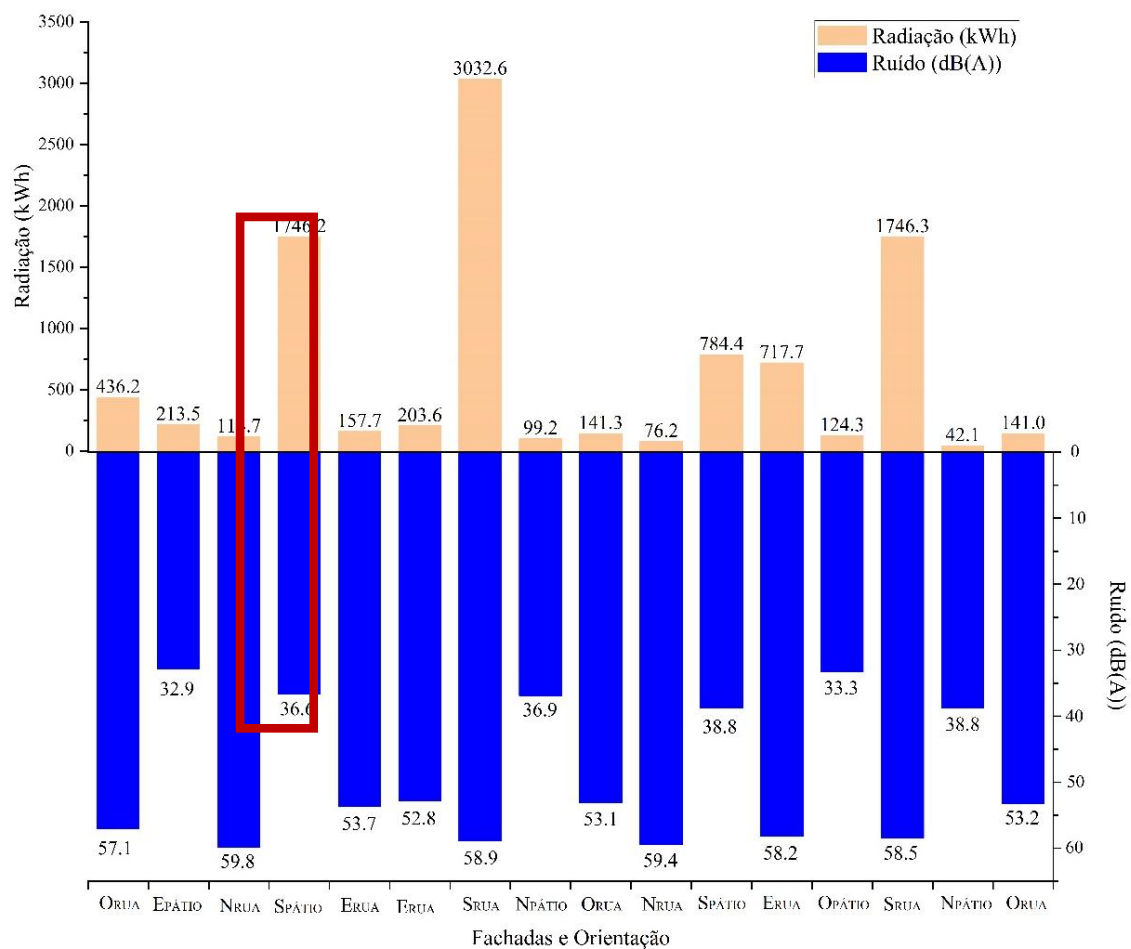


Figura 68: Análise comparativa entre ruído e radiação por fachada: Variação D

Como é possível verificar no gráfico da Figura 68 e nos anteriores as fachadas S_{rua} são as detentoras de maior exposição solar, por serem as fachadas com maior área de fachada, mas as fachadas $S_{pátio}$ são as que para além de boa exposição solar também beneficiam em termos de exposição ao ruído.

5.4.1.5 Análise de Variação E

A última proposta de variação analisada é a variação E, cujo objetivo é explorar a interação entre a exposição ao ruído e a orientação solar na configuração este-oeste. Essa proposta pretende compreender de que forma a combinação entre essas duas variáveis pode influenciar o desempenho do pátio, tanto em termos acústicos quanto solares.

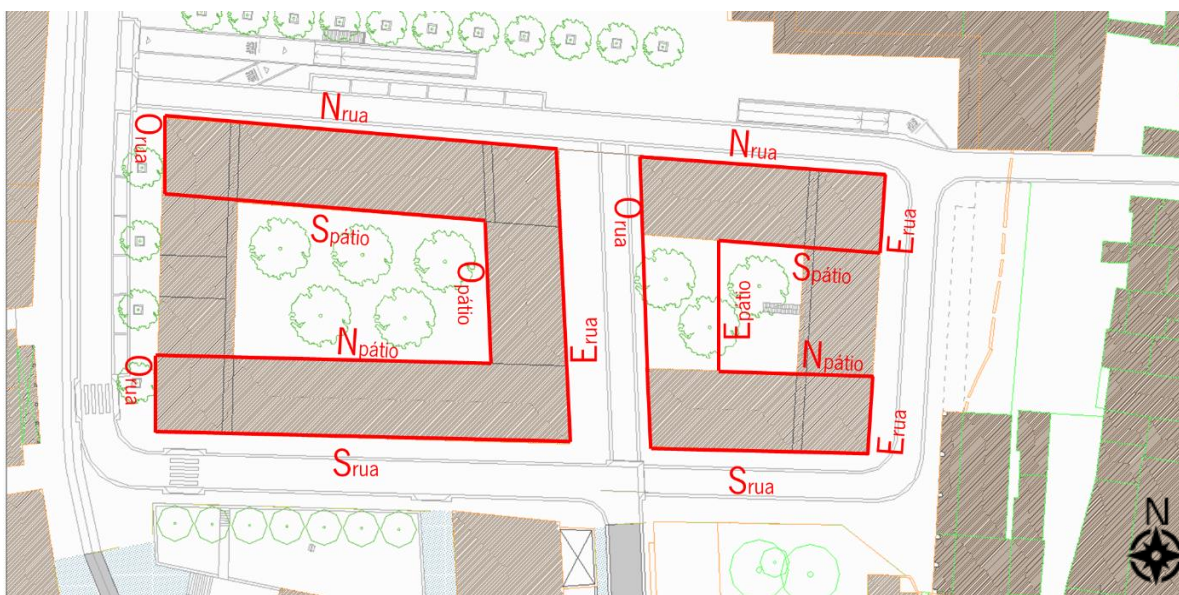


Figura 69: Forma original variação E

Em termos de ruído, a alteração da abertura na orientação este-oeste do pátio tem como consequência direta a exposição à via localizada a oeste, o que não ocorria nos modelos das variações anteriores. Nas variações precedentes, o pátio era relativamente protegido da exposição ao ruído proveniente dessa direção, proporcionando um ambiente mais resguardado no interior do edifício. Com a abertura da ala oeste, o ruído proveniente do trânsito da via adjacente passa a atingir diretamente o interior do pátio, sem encontrar obstáculos significativos que o dissipem. Com a nova configuração, essa proteção é reduzida, resultando em um aumento significativo dos níveis sonoros nas fachadas internas do pátio, conforme demonstrado pelos dados apresentados na Tabela 47.

Tabela 47: Forma original variação E (análise de ruído)

Fachadas	Orientação	Média energética por fachada (dB(A))	Mínimo por fachada (dB(A))	Máximo por fachada (dB(A))
O _{Rua}	Poente	57,5	56,3	59
N _{Rua}	Norte	59,8	56,9	62,3
S _{pátio}	Sul	47,5	36,5	53,4
E _{Rua}	Nascente	51,7	47,4	57,3
O _{pátio}	Poente	39,9	34,9	41,3
S _{Rua}	Sul	58,9	56,6	60,7
N _{pátio}	Norte	47,3	36	53,4
O _{Rua}	Poente	57,7	56,4	59,1
E _{Rua}	Nascente	57,5	55,5	58,8
S _{Rua}	Sul	58,5	55,7	60,1
N _{pátio}	Norte	51,2	43,9	55,1
E _{pátio}	Nascente	46,0	42,4	47,3
O _{Rua}	Poente	51,6	46,9	56,4
N _{Rua}	Norte	59,4	56,9	62,7
S _{pátio}	Sul	50,2	42,6	54,6
E _{Rua}	Nascente	59,0	56,3	61,5

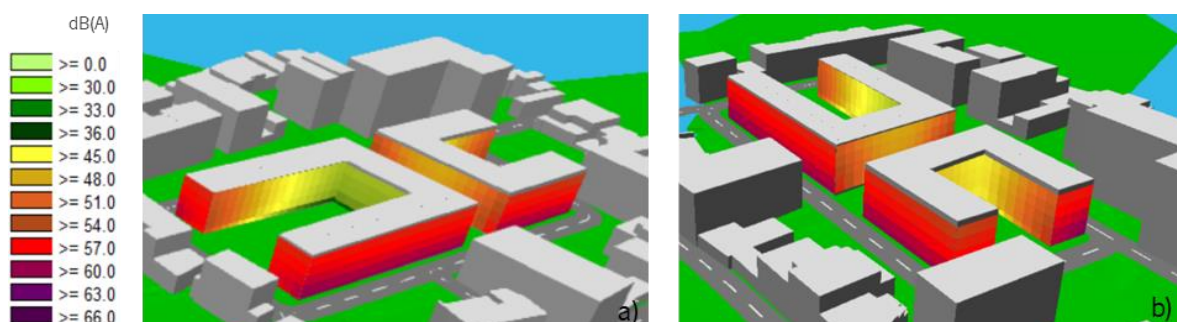


Figura 70: Níveis de ruído na fachada a) orientação O-S b) orientação S-E

A análise feita à variação E permite verificar que as fachadas interiores do pátio são regressivamente afetadas à medida que se distanciam da nova fonte de ruído (a via rodoviária a oeste). Desta forma, a redução à exposição ao ruído é feita perante um obstáculo ou devido ao efeito de divergência com o aumento da distância à fonte sonora.

Comparando novamente as fachadas a sul no pátio ($S_{pátio} = 47,5$ dB) e na rua ($S_{Rua} = 58,9$ dB) podemos observar um diferencial de 11,4 dB menor que o da Variação A que era de 14,4 dB. Mas se compararmos a fachada O_{Rua} (57,5 dB) com a O_{pátio} (39,9 dB) já temos um diferencial maior, neste caso de 17,6 dB, que se deve ao aumento da distância em relação à via.

Em termos de exposição solar, a nova abertura a oeste para o pátio, não deve influenciar muito os resultados comparativamente à Variação A. Se considerarmos que a abertura é a Oeste e não a Sul, em termos de otimização de fachada, não se espera uma alteração significativa de valores, como é possível constatar na Tabela 48.

Tabela 48: Forma original variação E (análise de radiação)

Fachadas	Orientação	Média aritmética por fachada (kWh/m ²)	Mínimo por fachada (kWh/m ²)	Máximo por fachada (kWh/m ²)
O _{rua}	Poente	0,72	0,52	0,91
N _{rua}	Norte	0,15	0,05	0,25
S _{pátio}	Sul	2,64	0,90	4,27
E _{Rua}	Nascente	0,98	0,47	1,48
O _{pátio}	Poente	0,54	0,22	1,14
S _{Rua}	Sul	3,50	0,62	4,35
N _{pátio}	Norte	0,14	0,04	0,24
O _{rua}	Poente	0,69	0,52	0,99
E _{rua}	Nascente	0,97	0,58	1,33
S _{rua}	Sul	3,73	2,42	4,33
N _{pátio}	Norte	0,13	0,04	0,24
E _{pátio}	Nascente	0,58	0,25	1,43
O _{rua}	Poente	0,75	0,52	1,13
N _{rua}	Norte	0,32	0,23	0,41
S _{pátio}	Sul	2,44	0,44	4,23
E _{rua}	Nascente	0,13	0,07	0,23

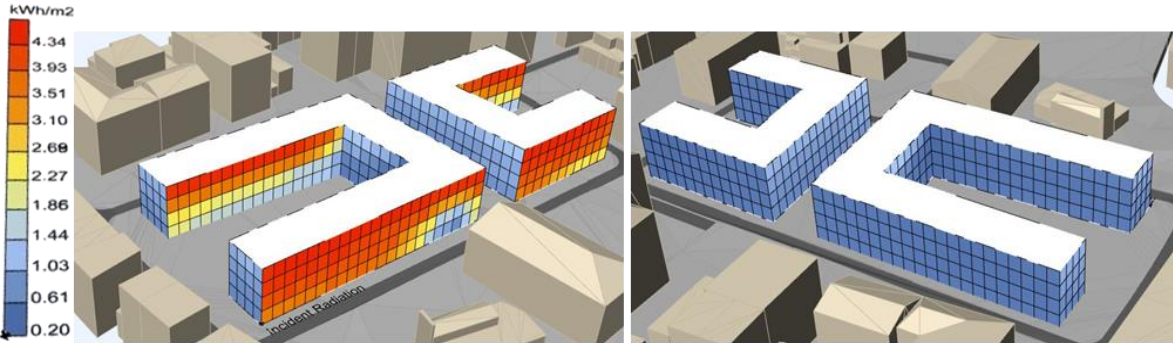


Figura 71: Radiação na fachada a) orientação O-S b) orientação N-O

A Figura 71 representa o resultado esperado que as fachadas a sul continuam a ser as mais expostas á radiação solar e que a nova alteração da abertura do pátio a oeste, só veio influenciar no início da fachada S_{pátio} (do edificado modificado nesta variação) onde a nova disposição do edificado, que agora

funciona como um obstáculo parcial à fachada sul do pátio semiaberto. O restante edificado é similar ou igual à Variação A, e por esse motivo o comportamento da exposição solar seja similar.

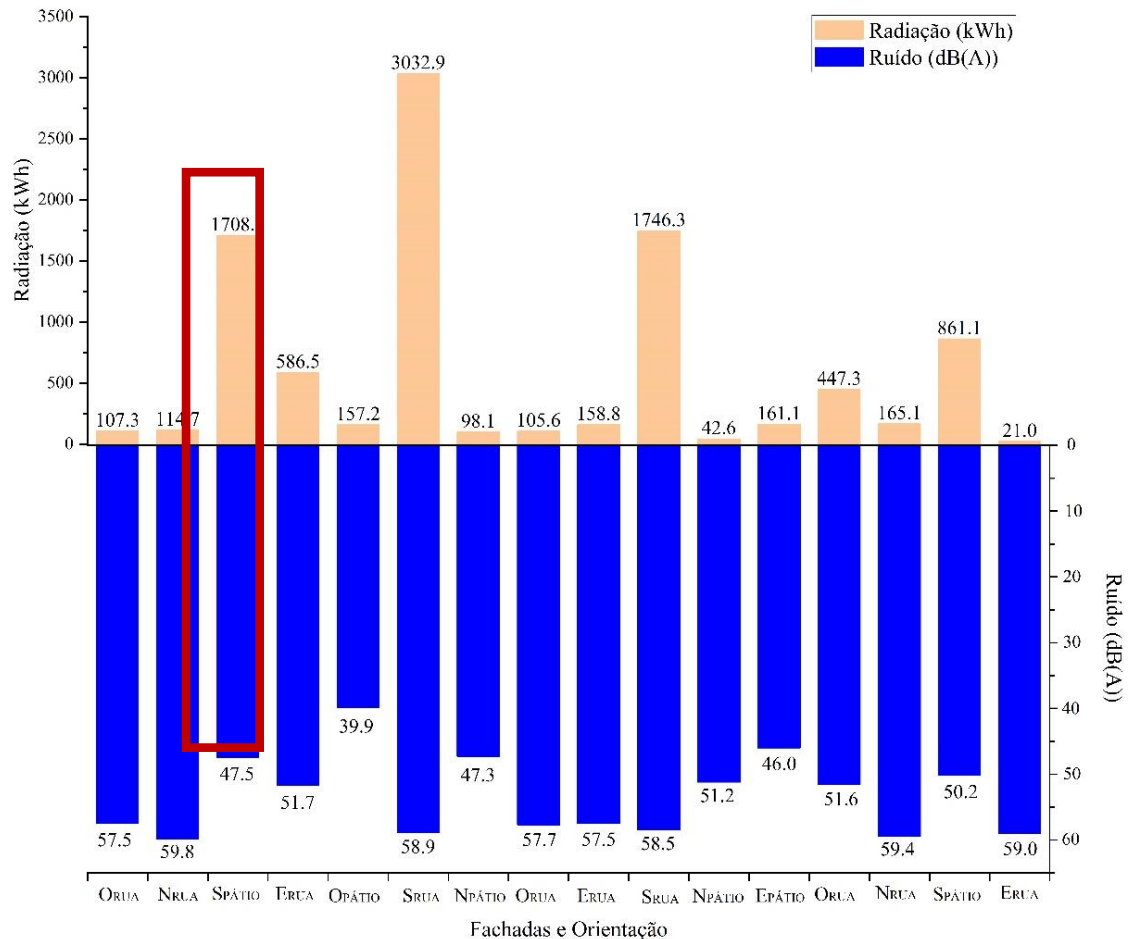


Figura 72: Análise comparativa entre ruído e radiação por fachada: Variação E

Na combinação proposta de otimização ou na escolha de uma fachada ótima, na variação E é difícil propor uma fachada, pois os níveis de ruído aumentaram significativamente e este fator por si só, já não é ótimo em termos de compromisso. Em termos de radiação solar não houve um aumento significativo dos valores, para propor um compromisso com a situação ótima em termos de exposição ao ruído. A fachada Spátio (1708,2 kWh com 47,5dB) apesar de tudo continua a ser dentro do cenário apresentado, o que estabelece algum compromisso.

5.4.1.6 Análise comparativa

A análise de sensibilidade apresentada a partir do estudo de caso teve como objetivo averiguar se o comportamento das situações ótimas de sombreamento solar e sombreamento acústico entrariam em situação de compromisso, já que na análise do caso de estudo preliminar foi verificado que, na maioria das situações, a otimização da exposição solar entra em conflito com a otimização do sombreamento acústico.

As cinco variações apresentadas anteriormente têm origem nas formas urbanas originais do estudo de caso, mas com aumento de área de pátio e extensão de fachadas, de forma a ser possível avaliar quais as fachadas com mais exposição solar e sombreamento acústico. O objetivo é avaliar a situação de compromisso, partindo das situações ótimas de sombreamento acústico, mas averiguando quais as fachadas com maior exposição solar e se estas são influenciadas pela variação das formas urbanas. Como foi referido anteriormente, o sombreamento solar no Inverno deve ser evitado ou reduzido, pois o objetivo das soluções ótimas e sustentáveis na edificação é obter a maior exposição solar possível na estação de aquecimento.

A variação A representa o modelo compacto do original, mas sem as aberturas pedonais ou outras permeabilidades do conjunto edificado. A variação B é a junção das duas formas urbanas que compõem a forma original, de forma a aumentar o pátio interior (sentido oeste-este) do conjunto e analisar essa relação de pátio totalmente fechado, implicando fachadas com uma maior extensão de área. A variação C elimina as edificações nas laterais mantendo só o conjunto edificado na orientação oeste-este. A variação D é uma variação da A mas com o pátio semiaberto dando acesso a partir das aberturas laterais. A variação E tem o mesmo objetivo da variação D, mas a abertura do pátio localiza-se a oeste e não este.

Em todas as variações de forma foram mantidas as mesmas condições da envolvente edificada, fontes de ruído (localização e potência da fonte) e procedimento de cálculo de ruído ambiente e radiação solar, apresentadas anteriormente.

No conjunto de variações apresentadas, alterando as configurações do pátio e o acesso ao mesmo, independentemente do aumento de área de exposição, quer ao ruído quer à radiação, as melhores situações de otimização entre exposição ao ruído e radiação solar, são sempre encontradas na combinação de fachadas pertencentes ao pátio com orientação a sul.

Em termos globais, as variações apresentadas no seu todo, apresentam médias energéticas para a exposição ao ruído e médias aritméticas para a exposição solar, muito similares, como é possível averiguar no gráfico da Figura 73.

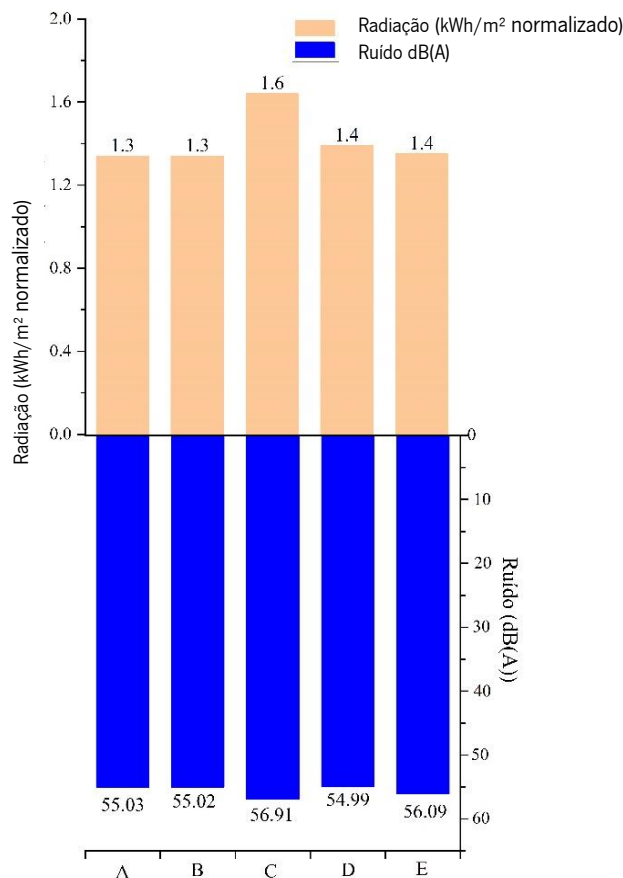


Figura 73: Comparativo entre as 5 Variações (A, B,C,D e E) em termos de radiação e ruído

A área total de fachada das cinco variações são muito próximas, exceto a Variação C com uma área total de fachada de 6614,53 m², inferior às restantes variações, por ser o conjunto de formas que eliminou as edificações laterais do edificado principal.

A variação C foi estudada por ser a tipologia de forma que se esperava ter uma captação de radiação solar maior no Inverno e como é possível averiguar no gráfico anterior, verificou-se isso mesmo. A ausência de laterais edificadas que promovam sombreamento solar sobre as fachadas, sobretudo a sul, promovem a otimização solar na edificação.

A variação A (7313,99 m²), a Variação B (7129,18 m²), a variação D (7038,18 m²) e a Variação E (7032,17 m²), para além de terem áreas globais mais próximas, todas têm pátios fechados ou semifechados. Estes promovem valores de exposição ao ruído mais próximos, exceto a Variação E, que na alteração do conjunto edificado abriu um dos pátios para a via, ficando exposto diretamente a uma fonte de ruído, aumentando assim os níveis de ruído do conjunto. Em termos comparativos, a variação B teve uma redução de ruído de 2%, mas também uma redução de 4% de radiação solar relativamente à variação A, o que não é benéfico.

O comportamento da variação C em relação à variação A é totalmente distinto, havendo um aumento de 23% da radiação, por haver 2 fachadas a sul de grande dimensão. Ainda que a norte existam as mesmas dimensões de fachadas, na análise global há este aumento de radiação que chega ao edificado. No entanto, em termos de compromisso, não é a melhor variação, pois é a que mais aumentou em termos de exposição ao ruído (3% de aumento).

A variação D relativamente à variação A manteve os níveis de ruído e aumentou a exposição à radiação solar. Este cenário é justificado pela ligeira alteração no pátio fechado que se abriu parcialmente para o interior do conjunto edificado. Por fim, a variação E tem um comportamento distinto em termos de orientação de abertura de pátio, que fez com que a zona interior desse novo pátio aumentasse os níveis de exposição ao ruído, resultando num ligeiro aumento destes níveis em termos globais. O comportamento em termos de radiação não é muito distinto perante a nova abertura de pátio, pois em termos de novo pátio houve um aumento ligeiro na fachada a sul do pátio, e em termos globais ocorreu um ligeiro aumento também da exposição solar relativamente à variação A, como é possível verificar na Tabela 49.

Tabela 49: Comparativos das outras variações em relação à forma original A

Formas Urbanas, análise global.	Radiação (kWh)		Ruído (dB(A))	
Variação B em relação à forma original A	-4%	▼	-2%	▲
Variação C em relação à forma original A	23%	▲	3%	▼
Variação D em relação à forma original A	4%	▲	0%	▼
Variação E em relação à forma original A	1%	▲	2%	▼

Em termos de otimização de exposição ao ruído, a variação B é a que apresenta o edificado mais favorável em termos de promoção de sombreamento acústico, proporcionado pela forma urbana com pátio totalmente fechado. Por sua vez, a variação C é a que apresenta a melhor disposição em termos de forma urbana, pois é a variação que dispõe de maior linearidade e ausência de reentrâncias que promovam o sombreamento solar, como já referido, o que não é benéfico em termos de otimização de exposição solar.

Em termos de compromisso, para além da variação A, são as variações B e D que apresentam melhor situação de equilíbrio entre redução dos níveis de ruído e aumento de exposição solar no Inverno.

5.4.2 Análise de Variações de Forma por fachada e piso

De forma a avaliar a fachada e o comportamento ao longo da fachada horizontalmente e verticalmente procedeu-se à análise de fachada por piso, para cada uma das fachadas de cada bloco de forma urbana e respetiva variação.

Em todos os dados das cinco variações é apresentada a planta da variação, as tabelas por fachada, compilando os valores por piso, referindo a orientação a que a fachada está exposta (nomenclatura da fachada), as médias, os mínimos e os máximos em termos de ruído e de radiação por fachada analisada e por piso.

Após cada tabela vem representado um gráfico de tendência, representativo do comportamento da fachada perante a exposição ao ruído e à radiação solar, ao longo dos pisos, isto é, do piso mais baixo até ao mais alto. Para facilitar a análise, foram adotados iguais intervalos dos eixos das ordenadas do ruído e da radiação solar, nos vários gráficos desenvolvidos. Em termos de níveis de ruído, o intervalo é entre 30 - 65 dB(A) e em termos de radiação é entre 0 - 4,5 kWh/m².

Para facilitar a compreensão da análise realizada, apresenta-se um exemplo de cada orientação da variação A, enquanto as demais figuras, tabelas e gráficos das outras variações foram incluídos no Anexo IV.

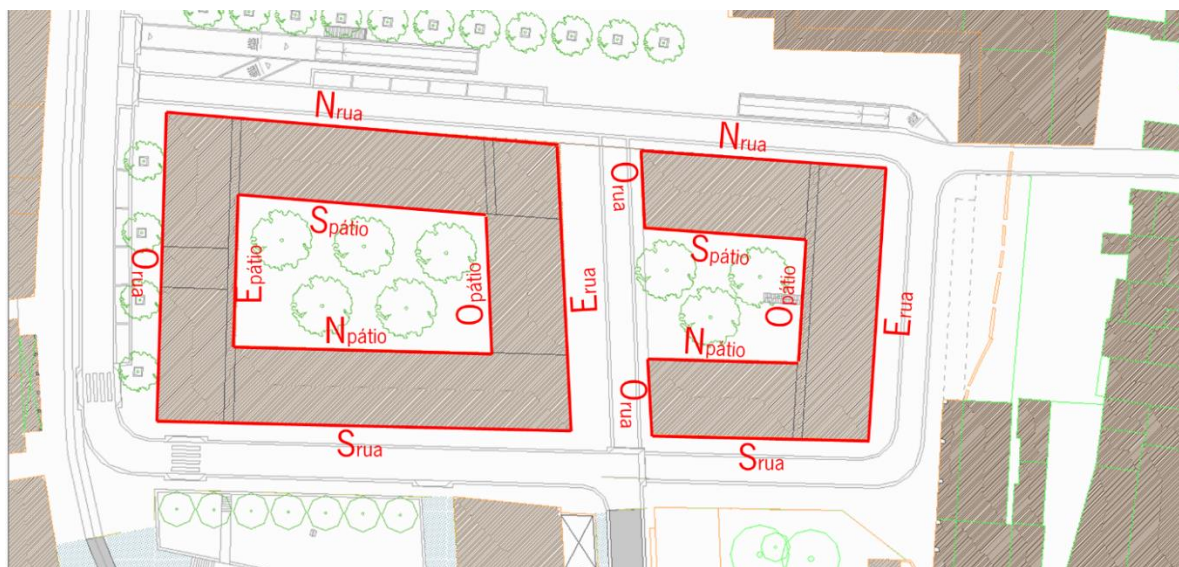


Figura 74: Ilustração da variação A

Tabela 50:Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Orua- Orientação Oeste)

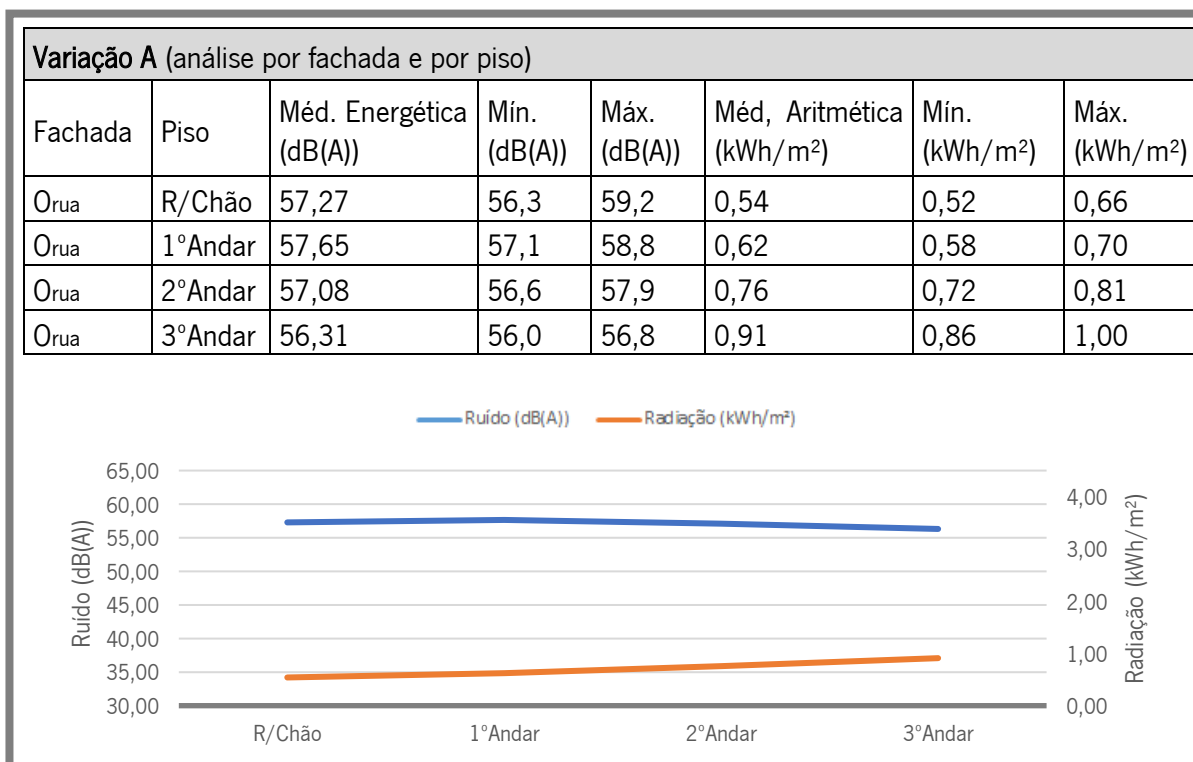


Tabela 51: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Epátio - Orientação Este)

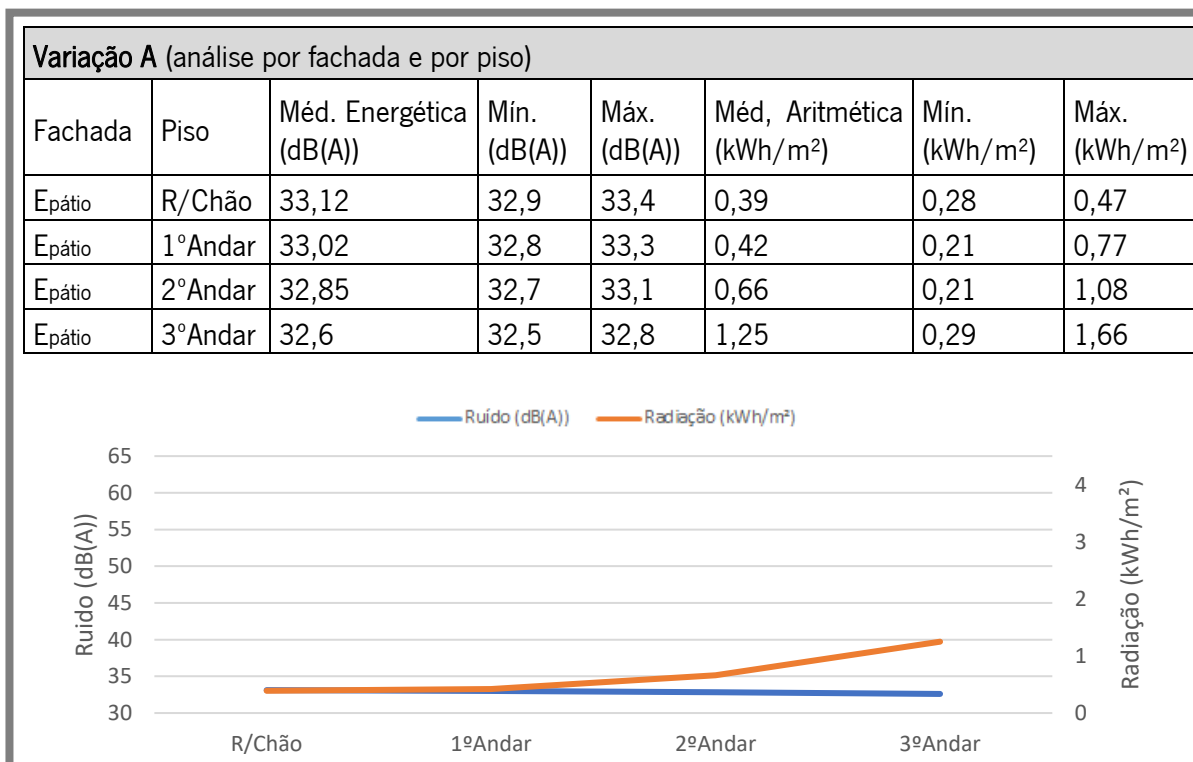


Tabela 52: Variação A (análise por fachada e por piso)(fachada Nrua - Orientação Norte))

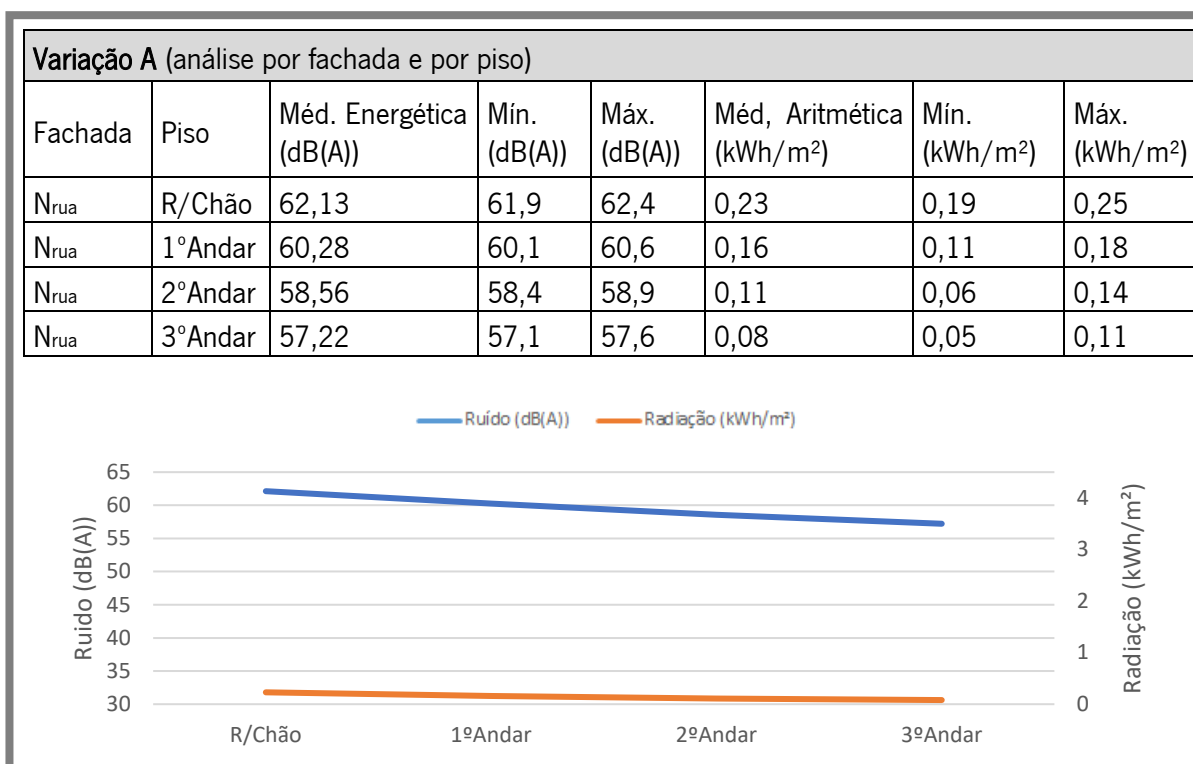
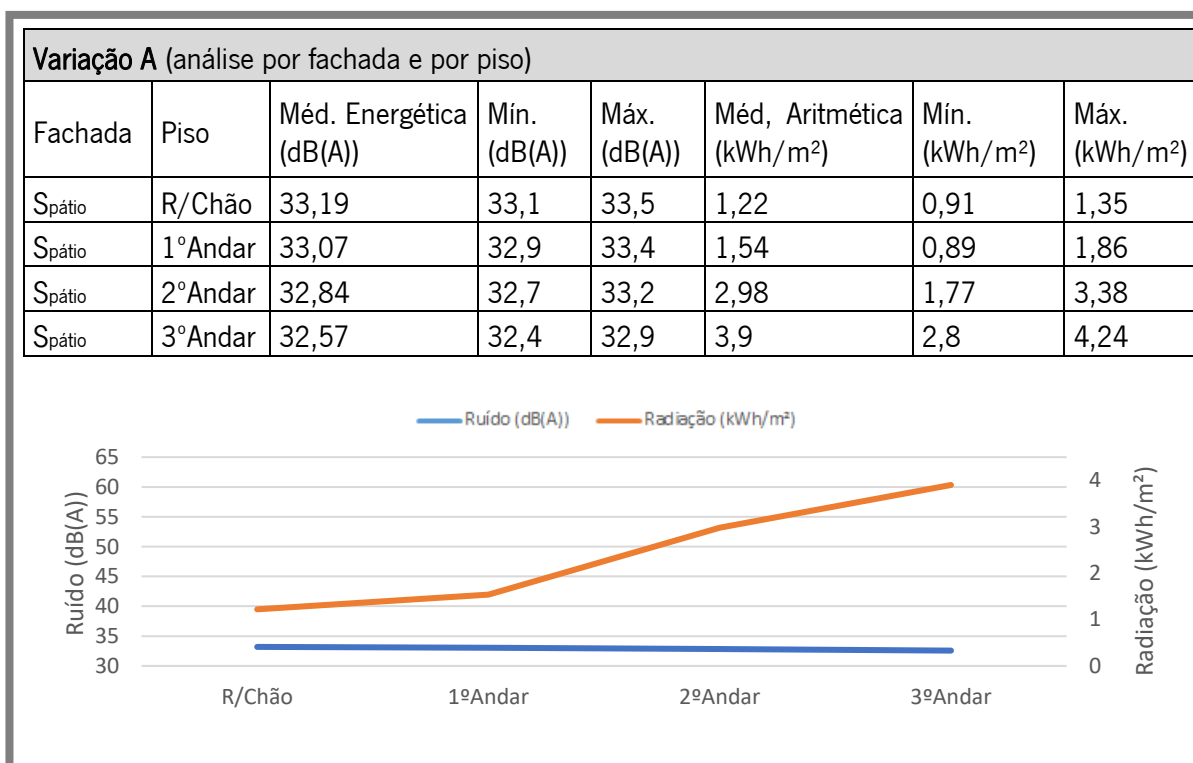


Tabela 53: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio – Orientação Sul)



5.4.2.1 Resultados da análise

Como foi possível ver nas cinco variações de forma, os valores mínimos e máximos por piso sofrem alguma variação, diminuindo à medida em que o ruído se propaga em altura. Existe, especialmente nas fachadas diretamente expostas à fonte de ruído, um ligeiro aumento dos valores do 1º andar relativamente ao R/Chão. Este fenómeno é explicado devido ao formato da frente de onda acústica que é aproximadamente cilíndrica) resultando nesta ligeira variação (Calleri *et al.*, 2017; L. T. Silva, 2007).

A radiação solar das cinco variações de forma, como é possível averiguar nas tabelas anteriores, tem tendência a aumentar à medida em que se sobe em altura, o que pode ser explicado pela diminuição progressiva da obstrução. Como referido anteriormente, a regra dos 45° entre edificações implementada pela regulamentação portuguesa (Ministério das Obras Públicas - Gabinete do Ministro, 1951), proporciona que ao cumprir esta premissa, a maioria dos r/chãos e primeiros andares dos edifícios tenham acesso a pouca exposição solar ou pelo menos é menor em relação aos pisos superiores.

Pode-se constatar que as fachadas com menos obstáculos têm valores superiores de radiação e os valores aumentam à medida que se sobe em altura. No entanto, nos edifícios com obstáculos observa-se um aumento significativo do rés do chão para o 1º andar ou para o 2º andar dependendo da obstrução.

Nas fachadas a norte, a radiação em teoria deveria ser zero, como anteriormente explicado. No entanto, tal não se observa devido a um efeito de reflexão e difusão que ocorre nas superfícies do edificado envolvente. Quando a radiação solar incide numa superfície, pode ser refletida de duas maneiras: especularmente e difusamente. A reflexão especular é idêntica à reflexão de um espelho plano, isto é, o ângulo entre os raios solares incidentes e a normal da superfície é igual ao ângulo entre os raios solares refletidos e a normal; o ângulo azimutal varia de 180°. No caso de uma reflexão difusa, a radiação é refletida uniformemente em todas as direções, independente das características da radiação incidente.

Em geral, a reflexão de uma superfície não é especular nem difusa, mas uma mistura das duas. Quando a superfície em que a radiação solar incide não é totalmente difusora, a quantidade de radiação refletida depende do ângulo de incidência. Para elevados ângulos zenitais a reflexão é maior.

No estudo de caso desenvolvido, há dois componentes da definição que foram considerados, o primeiro é o Cumulative Sky Matrix, que é uma matriz que contém valores de radiação de cada pedaço de uma cúpula do céu. A criação desta matriz é um passo prévio necessário antes de efetuar a análise da radiação incidente com a geometria dada.

A introdução dos valores da Radiação Normal Direta, da Radiação Horizontal difusa, entre outros dados necessários ao cálculo da Radiação incidente, obtidos a partir dos ficheiros climáticos EPW (ficheiros usados na maioria dos softwares de simulação de radiação solar), implica uma margem de imprecisão nos resultados apresentados. Os ficheiros EPW são baseados em dados meteorológicos históricos e modelados, que podem não representar com total exatidão as condições reais num determinado momento ou local específico. Os ficheiros EPW fornecem valores médios horários ou diários, o que pode não captar variações instantâneas da radiação solar devido a fatores como nebulosidade momentânea ou obstruções locais. Como os softwares de simulação utilizam algoritmos que fazem aproximações com base nos dados inseridos, podendo amplificar pequenos desvios nos valores reais da radiação solar.

Como referido no capítulo sobre os equipamentos de medição, a radiação normal direta e a radiação horizontal difusa são medidas por instrumentos que podem ter margens de erro inerentes, levando a pequenas imprecisões nos valores registados.

A irradiância refletida é contabilizada de forma grosseira através de um “hemisfério terrestre” emissivo, que é como o hemisfério da cúpula do céu e é derivado da reflexão que está associada ao modelo. O resultado vê-se afetado pela reflexão do solo e das fachadas do modelo e daí as fachadas a norte apresentarem valores diferentes de zero e, para além disso, verifica-se uma diminuição de valores à medida que se sobe de piso.

Nesse sentido, e como já foi referido, é nas orientações a sul que se consegue obter maior exposição solar, o conjunto de formas que detêm um pátio mais fechado (como as Variações A ou B) é o conjunto que mais favorece em termos de sombreamento acústico. Em termos de otimização solar, o mais benéfico é reduzir os obstáculos à emissão solar (sombreamento solar), como na variação C.

6. ANÁLISE E PROPOSTAS

A regulamentação portuguesa prioriza as questões térmicas em relação às questões de incomodidade ao ruído, nomeadamente, em termos de comportamento térmico, para uma maior redução do consumo energético nos edifícios. Os propósitos e as transposições das diretivas europeias em termos de comportamento térmico, (subcapítulo 2.4.2) mostram os objetivos e prazos a cumprir na redução do consumo energético. No estudo de caso apresentado, parte-se de cenários ótimos em termos de ruído para averiguar quais as formas urbanas e respetivas orientações que melhor otimização solar promovem.

O estudo de caso, bem como o estudo preliminar, vêm demonstrar que as formas urbanas que apresentam reentrâncias ou pátios interiores promovem a redução do ruído, sem recorrer à estratégia habitual de aumentar o distanciamento à fonte de ruído, neste caso, em particular às vias de tráfego rodoviário ou na criação de obstáculos entre a fonte e o recetor.

A proposta do governo francês em combinar uma regulamentação que inclua as questões acústicas no regulamento térmico, é uma proposta de boas práticas que poderia ser útil implementar em Portugal, ou pelo menos refletir sobre as premissas, as condicionantes e os objetivos pretendidos com a mesma.

O Ministério da Transição Ecológica francês tinha como objetivo, em 2016, reduzir as necessidades energéticas dos edifícios, considerando que o setor da construção francesa representava 44,0% do total de energia consumida em França. Era, portanto, o setor mais intensivo em energia, antes dos transportes, cuja participação ascende a 31,3% (Ministère du Partenariat avec les territoires et de la Décentralisation 2020).

Atualmente, o objetivo mantém-se com os requisitos do RE 2020 que propõe: um consumo máximo de aquecimento de 12 kWh/m² por ano; um consumo total de energia primária inferior a 100 kWh/m² por ano (aquecimento ambiente e de águas sanitárias, iluminação artificial e eletrodomésticos) e um “custo de 0 kWh/m²” por ano devido à produção de energia renovável que cubra, pelo menos, as necessidades da habitação.

Para o governo francês, desde o primeiro regulamento térmico em 1950 (ver a evolução do regulamento térmico no subcapítulo 2.5.2), o conforto térmico, mas também o acústico, era rudimentar e a necessidade de redução de energia estava e está ligada às atuais necessidades de aquecer e arrefecer as habitações, que envolve, uma renovação de edifícios existentes; o estabelecimento de regulamentações térmicas para todas as novas construções.

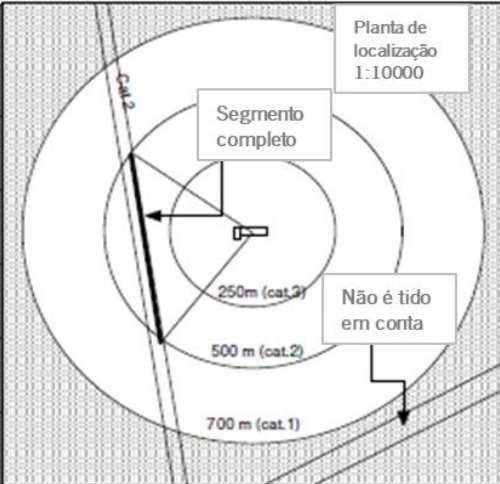
As habitações construídas há cerca de vinte anos, que cumpriam a Regulamento Térmico RT 2000, por exemplo, já não cumprem as normas térmicas vigentes. Este fenómeno deve-se, como seria de esperar, a materiais de construção e isolamento que não são tão eficientes como os oferecidos atualmente, o que aumenta as necessidades energéticas do edificado pré-existente.

Uma das propostas de governo francês para promover o conforto ambiental das habitações, foi considerar os requisitos de proteção ao ruído no regulamento térmico e proceder à classificação de ruído, neste caso, o ruído rodoviário (principal fonte ruído ambiente em meio urbano).

A infraestrutura de transporte terrestre nas proximidades dos edifícios é classificada em diferentes categorias. Esta classificação é dada por decreto municipal, nomeadamente o decreto nº 95-21 de 9 de janeiro de 1995 (Décret nº95, 1995).

Para caracterizar as necessidades de isolamento do edifício, trata-se de identificar as infraestruturas suscetíveis de serem tidas em conta, nomeadamente as infraestruturas das categorias 1, 2 e 3 e esta tarefa é executada num plano de localização à escala 1/10.000. A Tabela 114 representa esse esquema de influência e a tabela da figura identifica as categorias de infraestrutura segunda a distância à edificação.

Tabela 54: Classificação da distância em relação à fonte de ruído Fonte: (Arrêté du 28 décembre 2012)

Categoria de infraestrutura	Distância máxima para ter em conta a infraestrutura	
Categoria 1	700m	
Categoria 2	500m	
Categoria 3	250m	
Categoria 4	100m	
Categoria 5	30m	

A Integração das condicionantes de proteção ao ruído no regulamento térmico propriamente dito está associada à determinação da classificação BR que é efetuado vão a vão através da aplicação do Anexo 2 do Decreto RT2000. Os resultados da avaliação são definidos por classes BR1, BR2, BR3 que é baseada na classificação da categoria de infraestrutura de transporte terrestre nas proximidades da construção.

A vista da infraestrutura a partir do vão (fachada) é determinada a partir da planta da infraestrutura, após dedução de quaisquer obstáculos à propagação de ruído, com altitude superior ao nível considerado. Uma vista direta significa uma vista plana da infraestrutura superior a 30°, após dedução dos obstáculos à exposição: é o caso das faces laterais de um edifício sem máscara.

Uma vista parcial significa um ângulo de visão horizontal inferior a 30°, após dedução dos obstáculos à exposição. Existe uma visão obscurecida da infraestrutura quando a infraestrutura não pode ser vista, tendo em conta os obstáculos à exposição, a partir do vão. Uma vista traseira é para a fachada traseira do edifício. Uma vista traseira protegida significa um vão localizado na fachada posterior, afastado do edifício e de qualquer fachada oposta que estaria diretamente exposta ao ruído da infraestrutura. A figura 79 representa a classificação descrita.

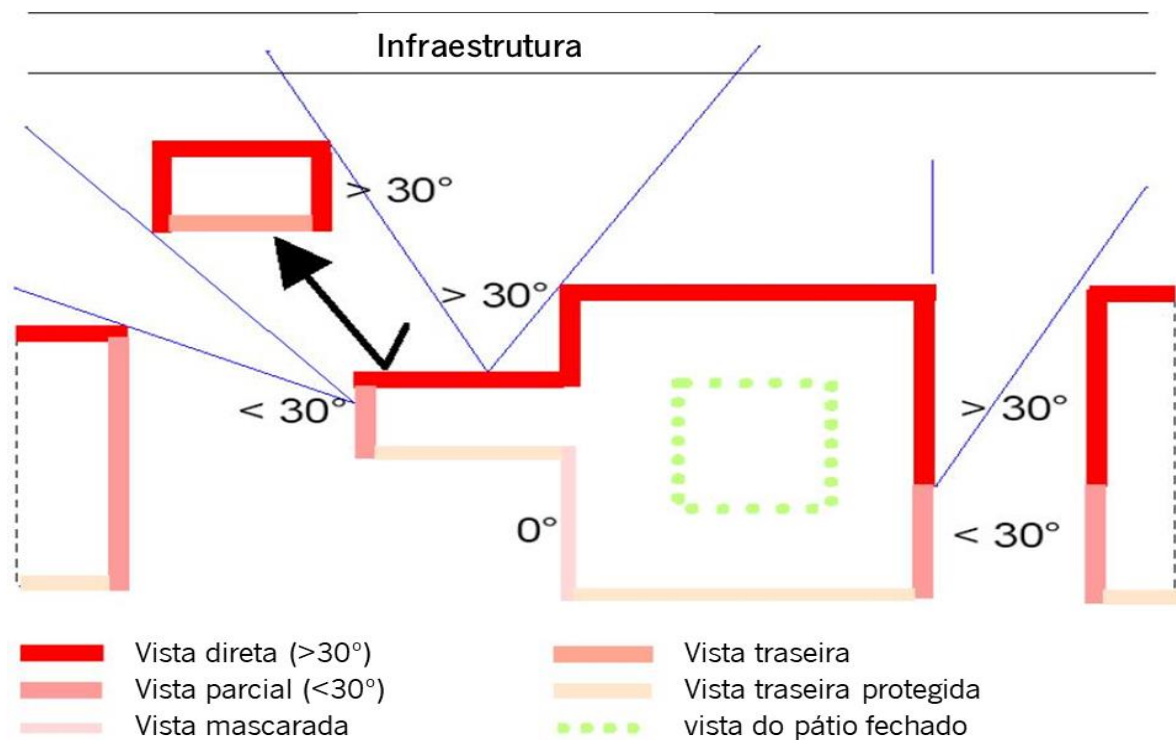


Figura 75: Representação da classificação perante a via. Fonte: (Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d'application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3, 2016)

Um “obstáculo de exposição” é uma máscara à propagação de ruído (edifício, barreira, topografia...) com uma altitude maior ou igual à do nível exposto considerado. Quando o obstáculo se situa a mais de 250 m do vão em causa, e para ter em conta o efeito da propagação do ruído (inversão térmica noturna), são necessários 10 m de altitude mínima para ser considerado obstáculo. Quando os obstáculos à visão direta da infraestrutura forem de altura insuficiente para constituir um “véu mascarado”, mais do que permitir a eliminação da visão direta de infraestrutura, a visão é sempre considerada parcial (Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d'application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3, 2016).

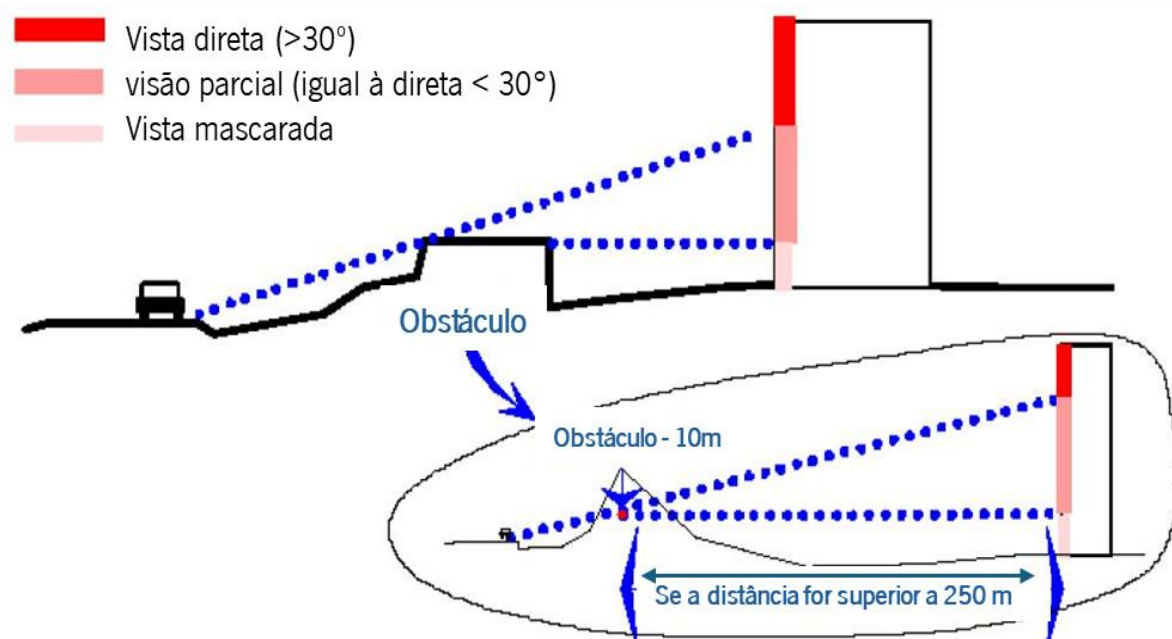


Figura 76: Representação do obstáculo perante a via. Fonte: (Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d'application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3, 2016)

O termo “inclinado” é definido exclusivamente na regulamentação térmica como uma inclinação de menos de 60° na horizontal, sendo considerado vão “vertical” o que apresenta uma inclinação superior a esse valor.

A distância da infraestrutura é determinada em planta, projetada em relação à parte central do vão. A parte inferior do telhado e a fachada, quando suficientemente altas em relação ao nível considerado, constituem um obstáculo à exposição ao ruído. Consequentemente, a visão da infraestrutura é considerada “direta” se houver uma visão direta e “oculta” no caso de um caminho ao pé de um edifício (ADEME, 2023).

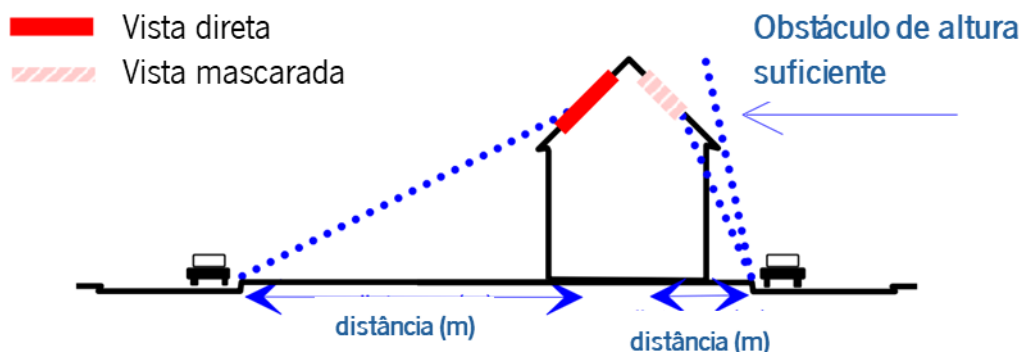


Figura 77: Representação do obstáculo em altura. Fonte: (Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d'application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3, 2016)

Se o vão estiver no telhado (caso de janelas de sótão) podemos determinar BR a partir do centro a parte do telhado correspondente à sala para a qual se abre o vão (em geral, só existe muito pouca diferença na distância entre esses dois pontos quando o vão é único, e nenhuma diferença na classificação BR se houver vários vãos). Nas tabelas seguintes (Tabela 115- 118) estão representadas as diferentes classificações BR nas respectivas categorias de Infraestrutura (1,2,3,4, e 5).

Tabela 55: Classificação BR: Infraestrutura de Categoria 1. Fonte:(Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d'application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3, 2016)

Infraestrutura de Categoria 1	Vista da infraestrutura a partir do vão Distância até à infraestrutura	Vista direta	Vista Parcial	Mascarado/ Traseira	Traseira Protegida	No pátio fechado
	Inferior a 50m	BR3	BR3	BR3	BR2	BR2
	50-160 m	BR3	BR3	BR2	BR2	BR1
	160-300 m	BR3	BR2	BR2	BR1	BR1
	300-460 m	BR2	BR2	BR1	BR1	BR1
	460-700 m	BR2	BR1	BR1	BR1	BR1
	>700 m	BR1	BR1	BR1	BR1	BR1

Tabela 56: Classificação BR: Infraestrutura de Categoria 2. Fonte:(Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d'application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3, 2016)

Infraestrutura de Categoria 2	Vista da infraestrutura a partir do vão Distância até à infraestrutura	Vista direta	Vista Parcial	Mascarado/ Traseira	Traseira Protegida	No pátio fechado
	0-25 m	BR3	BR3	BR3	BR2	BR2
	25-80 m	BR3	BR3	BR2	BR2	BR1
	80-250 m	BR3	BR2	BR2	BR1	BR1
	250-370 m	BR2	BR2	BR1	BR1	BR1
	370-500 m	BR2	BR1	BR1	BR1	BR1
	>500 m	BR1	BR1	BR1	BR1	BR1

Tabela 57: Classificação BR: Infraestrutura de Categoria 3. Fonte:(Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d'application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3, 2016)

Infraestrutura de Categoria 3	Vista da infraestrutura a partir do vão Distância até à infraestrutura	Vista direta	Vista Parcial	Mascarado/ Traseira	Traseira Protegida	No pátio fechado
	0-30 m	BR3	BR3	BR2	BR2	BR1
	30-100 m	BR3	BR2	BR2	BR1	BR1
	100-160 m	BR2	BR2	BR1	BR1	BR1
	160-250 m	BR2	BR1	BR1	BR1	BR1
	>250 m	BR1	BR1	BR1	BR1	BR1

Tabela 58: Classificação BR: Infraestrutura de Categoria 4. Fonte:(Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d'application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3, 2016)

Infraestrutura de Categoria 4	Vista da infraestrutura a partir do vão Distância até à infraestrutura	Vista direta	Vista Parcial	Mascarado/ Traseira	Traseira Protegida	No pátio fechado
	0-10 m	BR3	BR3	BR2	BR2	BR1
	10-30 m	BR3	BR2	BR2	BR1	BR1
	30-60 m	BR2	BR2	BR1	BR1	BR1
	60-100 m	BR2	BR1	BR1	BR1	BR1
	>100 m	BR1	BR1	BR1	BR1	BR1

Tabela 59: Classificação BR: Infraestrutura de Categoria 5. Fonte:(Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d'application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3, 2016)

Infraestrutura de Categoria 5	Vista da infraestrutura a partir do vão Distância até à infraestrutura	Vista direta	Vista Parcial	Mascarado/ Traseira	Traseira Protegida	No pátio fechado
	0-10 m	BR3	BR2	BR2	BR1	BR1
	10-20 m	BR2	BR2	BR1	BR1	BR1
	20-30 m	BR2	BR1	BR1	BR1	BR1
	>30 m	BR1	BR1	BR1	BR1	BR1

Utilizando como exemplo, a Classificação sonora de vão envidraçado da Infraestrutura de categoria 5, é a categoria que está mais próxima da fonte de ruído, mas sendo a fonte de ruído com menor tráfego automóvel.

A categoria 5 tem apenas uma classe de exposição BR3, que corresponde à obrigação de reforço do isolamento acústico além dos 30 dB da norma acústica. Tem cinco categorizações de classe de exposição BR2 que corresponde a níveis de exposição mais baixos específicos (desde o RT2000) que não requerem reforço de isolamento acústico, mas que conduzem a condicionantes térmicas de verão nas divisões associadas à ausência de ventilação noturna neste tipo de divisões.

Por último, as restantes categorizações de classe de exposição são BR1, que correspondem à mais baixa exposição de ruído. Porém, por convenção, um vão envidraçado é classificado como BR1 nos seguintes casos:

- nenhuma classificação de infraestrutura no entorno da construção por decreto municipal segundo o decreto nº 95-21 de 9 de janeiro de 1995;
- vãos de um edifício ou parte de um edifício para uso diferente do residencial, com exceção de dormitórios (hotéis, alojamentos, etc.);
- vãos de edifício ou parte de edifício destinados ao uso residencial classe BR2, com exceção dos dormitórios (quartos). No caso de estúdios, os vãos da sala principal classificados como BR2 não podem ser rebaixados para BR1.

Para determinados edifícios, nomeadamente aqueles localizados em zonas de ruído de aeroportos ou vias rápidas, poderá ser necessária a instalação de sistemas de refrigeração ativa para garantir um bom conforto térmico no verão enquanto as janelas estão fechadas, tanto na Categoria CE1 como na CE2.

A **Categoria CE1**: são construções que podem ser projetadas sem equipamentos de climatização mecânica. O Ar condicionado não é proibido, mas o seu possível consumo de refrigeração terá então de ser compensado por uma redução noutro tipo de consumos energéticos do edifício.

A **categoria CE2**: são construções com mais condicionantes (hospitais, escritórios em zonas ruidosas e em zonas de clima muito quente, edifícios altos, etc.) e que necessitam na maioria dos casos de ar condicionado. Neste caso, o RT 2012 prevê que as instalações não estarão, portanto, sujeitas aos requisitos de conforto de verão (Tic).

- Para zonas ou partes de zonas da categoria CE1 e para cada zona do edifício, definida pela sua utilização, o requisito de conforto de verão é expresso da seguinte forma: o Tic é inferior ou igual ao ponto de referência de temperatura interior convencional para a área, $T_{ic,ref}$.

Por exemplo, um edifício de escritórios terá a classificação CE2 se uma das seguintes condições for cumprida:

- Vãos expostos ao ruído BR2 ou BR3;

- Edifício localizado na zona climática H1c ou H2c a menos de 400m de altitude;
- Edifício localizado na zona climática H2d ou H3 a menos de 800m de altitude.

A Tabela 120 representa a relação das classes de exposição ao ruído BR com as Zonas climáticas e pelo tipo de uso do edificado.

Tabela 60: Classificação Categoria CE1 e CE2 Fonte: (RT-2012.com, 2013)

		Zonas Climáticas (distância em altitude, m)													
Tipo de Uso	Vãos expostos às zonas de ruído	H1a	H1b	H1c<400m	H1c>400m	H2a	H2b	H2c<400m	H2c>400m	H2d<400m	H2d<400m e < 800m	H2d>800m	H3< 400m	H3<400m e < 800m	H3>800m
Habitação	BR1	CE1													
	BR2	CE1										CE2	CE1	CE2	CE1
	BR3	CE1										CE2	CE1	CE2	CE1
Escritórios	BR1	CE1	CE2	CE1	CE1	CE2	CE1	CE2	CE1	CE2	CE1	CE2	CE1	CE2	CE1
	BR2	CE2													
	BR3	CE2													
Outras situações consideradas pelo RT2012	BR1	CE2													
	BR2	CE2													
	BR3	CE2													

A proposta apresentada pelo governo francês e apresentada parcialmente neste capítulo, visa clarificar quais questões os requisitos acústicos integrantes do regulamento térmico. Como foi possível verificar é na classificação de vão perante a distância da fonte de ruído e pela categoria da infraestrutura que é atribuída a classe BR. O impacto desta classificação no regulamento térmico, depreende-se pela necessidade de isolamento do vão envidraçado e pela necessidade de arrefecimento do edificado em análise.

A atribuição do coeficiente CE1 ou CE2 é umas das respostas de compromisso entre a classe de exposição ao ruído (BR), consoante o tipo de uso e a zona climática.

As soluções de compromisso podem ser consideradas de boas práticas e poderiam ser úteis implementar em Portugal, se pelo menos ao refletir sobre as premissas, as condicionantes e os objetivos pretendidos com a mesma fossem considerados em cada análise de projeto e houvesse um estudo de impacto quando essa análise não é considerada. Nomeadamente, considerar o impacto

que a exposição ao ruído tem direta e indiretamente nos vãos, sobretudo nos envidraçados, e como esta exposição tem impacto na necessidade de isolamento ou redução de exposição ao ruído.

As soluções para a correção de conforto (neste caso térmico e acústico) implicam sempre um custo, primeiramente financeiro (investimento público e/ou privado), depois ambiental (formas de aquecimento e arrefecimento das habitações) pelo uso de equipamentos poluentes (combustíveis fósseis, como o aquecimento a gás) ou pelos recursos florestais (que dependem da disponibilidade da matéria) mas também pelas questões de saúde, como o impacto na qualidade do ar (uso de biomassa para o aquecimento).

Em Portugal, segundo os dados do Instituto Nacional de Estatística (INE), da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) e do Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico (ICESD) 2020, 70% dos edifícios não são eficientes do ponto de vista energético, 28% dos consumos de energia final da União Europeia (UE) são de edifícios residenciais (INE/DGEG/ADENE, 2021). Estes dados, refletem os gastos em aquecimento e arrefecimento dos edifícios, mas também as emissões de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases efeito de estufa, inerentes ao consumo energético que deixam uma pegada ecológica (DGEG, 2023; Palma *et al.*, 2023).

A redução de equipamentos ativos de arrefecimento (como o Ar-condicionado), a redução de uso de equipamentos que consomem biomassa ou combustíveis fósseis para o aquecimento, ou apelando para soluções passivas de aquecimentos e arrefecimento, quer através de renovações, quer no isolamento ou ventilação natural do edificado, deverá reduzir as necessidades energéticas, estimular a conforto ambiente e promover assim a eficiência energética dos edifícios.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em Portugal, a altura de qualquer edificação é condicionada a um afastamento de 45° para as edificações fronteiras (RGEU, 1951). Além de não contemplar a especificidade da orientação solar que poderá vir em benefício ou prejuízo das habitações contíguas, nunca fica salvaguardada a insolação direta de sul dos pisos mais baixos, dado que o ângulo da altura do sol no azimute no solstício de Inverno em qualquer das latitudes do território português é significativamente menor do que 45° (Decreto-Lei nº 118/2013 (SCE, REH, RECS), 2013; Diretiva 2010/31/EU Eficiência energética dos Edifícios, 2010).

A aplicabilidade dos regulamentos térmicos e acústicos (Regulamento Geral de Ruído, o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios e o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios) ora por omissão, ora por defeito ou por excesso torna muitas das diretivas de otimização (acústica e térmica) impraticáveis ou entram em contrariedade.

Quais as formas urbanas que proporcionam uma otimização da exposição solar na estação de aquecimento e o sombreamento acústico?

O estudo preliminar pretendeu responder à primeira questão de investigação e estudar as formas urbanas adotadas do modelo de Pedro (1999) que de alguma forma otimizem as potencialidades acústicas e térmicas, e que possam permitir o estudo da relação de compromisso que se pretende alcançar com a compatibilização entre a exposição solar e o sombreamento acústico.

No decorrer desta abordagem preliminar baseado nos trabalhos de Oliveira (2011) e Coutinho (2018), foram utilizados indicadores de forma urbana (CI, ROS e Fractal), que permitiram comparar os dois estudos e, no âmbito das tipologias de forma apresentadas, verificar quais as que potenciam o sombreamento acústico e a exposição solar. Os modelos de forma selecionados têm limitações, como a abrangência, mas permitiram chegar a algumas conclusões, nomeadamente:

- As tipologias com formatos de “reentrâncias”, como os formatos em U, em L ou em O, são as formas urbanas que proporcionam mais zonas protegidas ao ruído. A não linearidade do conjunto de fachadas funciona como um obstáculo à propagação do ruído, e daí proporcionar

áreas protegidas, que se traduzem em níveis de ruído mais reduzidos, comparativamente com as formas urbanas sem “reentrâncias” e que estão diretamente expostas às fontes de ruído.

- As formas urbanas mais lineares e compactas em volumetria (como as torres) são as que apresentam valores de radiação solar maiores, comparativamente às não lineares. A ausência de obstáculos à exposição solar explica essa conclusão.
- As “reentrâncias” em termos solares funcionam como impedimento ou obstrução à radiação e daí o sombreamento solar ser algo a evitar.
- A forma urbana que melhor representa a situação ideal para obter maior incidência de radiação solar nas fachadas, por apresentar uma volumetria simples, linear e compacta, é simultaneamente a que apresenta o pior cenário em termos de área exposta ao ruído, pelas mesmas características (volumetria simples, linear e compacta).

As conclusões apresentadas pelo estudo preliminar tentam dar resposta a estas “*incompatibilidades*” de otimização de exposição solar e sombreamento acústico. Tornou-se pertinente estudar o compromisso que se poderá alcançar entre as duas variáveis.

Considerou-se pertinente basear o estudo a partir de formas urbanas que promovam, de forma natural, situações favoráveis perante a exposição ao ruído, isto é, que a composição das formas urbanas ou conjuntos edificados promovam áreas de sombreamento acústico.

A promoção do sombreamento acústico está associada à disposição do edificado perante a fonte de ruído. Para que tal favorecimento aconteça é necessário a implementação de obstáculos que impeçam ou reduzam os níveis de exposição ou, em alternativa, implementar o distanciamento face à exposição direta à fonte de ruído.

Neste âmbito, para escolha do estudo de caso, só foram admissíveis formas urbanas que, na sua constituição edificada, contemplem “naturalmente” áreas de sombreamento acústico, como por exemplo, os pátios. Este requisito permite garantir, à partida, soluções favoráveis em termos de exposição ao ruído, sem recorrer a obstáculos artificiais, que funcionem como redutores de exposição sonora.

De modo a ser possível concretizar uma análise prática do estudo preliminar e averiguar a situação de compromisso entre a exposição solar e o sombreamento ao ruído, o quarteirão de Viana do Castelo encontrado correspondeu às premissas propostas. Isto é, deter um edificado com um pátio interior, o mais fechado possível e uma outra edificação com pátio semifechado (representativo das conclusões do estudo preliminar) e uma envolvente que se assemelhe à forma urbana do tipo linear.

A avaliação do ruído que chega à fachada do edificado do estudo de caso recorreu a um modelo de previsão de ruído. A validação do modelo foi complementada com medições *in situ*. Foram assim definidos 9 pontos recetores (pontos de recolha de dados (PC) localizados criteriosamente em torno do edificado do estudo de caso e de forma abranger situações diferentes em termos de ruído (relação entre fonte e recetor).

A avaliação da radiação solar que chega à fachada do edificado do estudo de caso, foi também baseada em métodos de simulação e auxiliada por medições de radiação solar para validação do modelo. Foram definidos 4 pontos de validação localizados nos quatro quadrantes do edificado em estudo.

- Para a previsão do estudo de radiação solar teve-se em conta a contribuição da topografia, da envolvente edificada e orientação solar, usando o modelo ASHRAE Revised Clear Sky Model (“Tau Model”) e os ficheiros climáticos (EPW) de Viana do Castelo.
- Determinação da radiação no recetor (pontos de validação).

As medições efetuadas *in situ* no estudo de caso e as simulações efetuadas a partir dos dados das medições, permitiram concluir que é o ponto de controle (PC8) no interior do pátio que apresenta níveis menores de exposição ao ruído, proporcionando mais sombreamento acústico, relativamente aos outros pontos medidos.

Em termos de radiação solar, é no ponto (PC4) mais a sul e com menos obstrução que os valores da radiação são maiores, pois relativamente aos restantes pontos estudados está na orientação privilegiada (sul), para maior captação de exposição solar. Estas situações vieram a ser comprovadas com a modelação do ruído e da radiação na fachada.

Como pode a forma urbana, em particular a regra dos 45° definida no RGEU, influenciar o sombreamento solar e acústico?

Com o objetivo de identificar quais as fachadas com maior exposição à radiação solar e ao ruído e avaliar a situação de compromisso, foi realizada uma análise de sensibilidade. Assim, foram criadas 5 variações da forma urbana original do estudo de caso, mantendo as mesmas condições de envolvente edificada e estrutura viária, passando por aumento de área de pátio e extensão de fachadas.

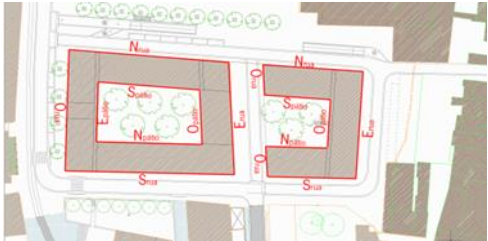
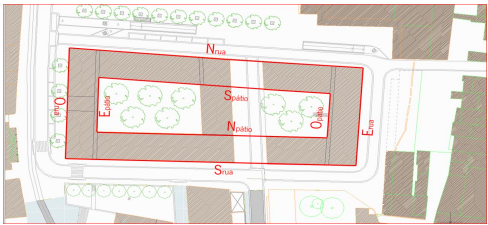
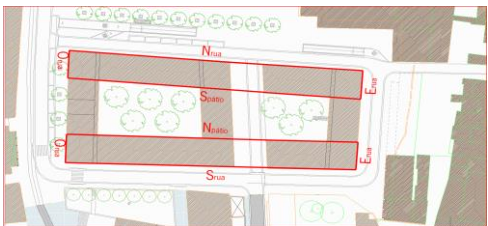
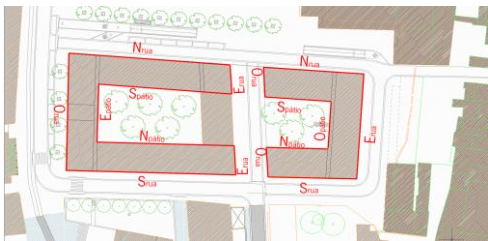
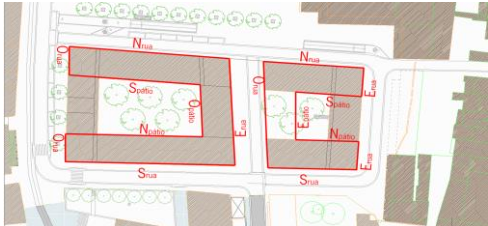
Esta abordagem permitiu analisar de que forma o ruído e a radiação incidem nas várias fachadas, permitindo retirar algumas conclusões sobre a interação destes fatores na configuração urbana. O estudo das cinco variações de forma urbana permitiu a partir da grelha de cálculo e para o pior cenário (solstício de inverno) apresentar na Tabela 61 os valores de radiação e de ruído, numa análise global de fachadas de cada variação.

A variação A apresenta, tal como a variação B, níveis de exposição ao ruído e à radiação solar similares. Em termos de área total de fachadas, há um ligeiro aumento de área de fachada da variação A comparativamente à variação B. Na variação C eliminou-se as laterais edificadas que promovem sombreamento solar sobre as fachadas, sobretudo a sul. Este procedimento resultou num aumento da radiação solar no edificado desta variação, como é possível verificar na Tabela 61, que apresenta o maior valor de radiação solar. Por outro lado, a variação C, devido à sua configuração aberta, como seria de esperar, é a variação que apresenta o pior comportamento em termos de exposição ao ruído.

A variação D é uma boa solução em termos de compromisso, por apresentar níveis de ruído baixo, ainda que pouco mais baixo que as variações A e B, mas que em termos de radiação solar representa um aumento ligeiro relativamente às mesmas variações.

No conjunto edificado da variação E, com a abertura de um dos pátios para a via, ficando exposto diretamente a uma fonte de ruído, aumentando assim os níveis de ruído do conjunto. Comparativamente, a variação E apresenta um ligeiro aumento da radiação, para além do aumento do ruído relativamente às variações A e B como é possível verificar na Tabela 61.

Tabela 61: O estudo das cinco variações (análise global)

Variação	Área total de fachada (m ²)	Radiação Média ponderada kWh/m ² normalizado	Ruído Média ponderada dB(A)
A 	7313,99	1,30	55,03
B 	7129,18	1,30	55,02
C 	6614,53	1,60	56,91
D 	7038,18	1,40	54,99
E 	7032,17	1,40	56,09

Excluindo as piores variações em termos de ruído (variação C e E) e fazendo uma análise do ruído nas fachadas, considerando 4 classes de exposição ao ruído, calculou-se o número de fachadas e a área total de fachada que está exposta, em média, às várias classes de ruído. A Tabela 62 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 62: Análise do ruído nas fachadas (considerando 4 classes de exposição ao ruído)

	Variação A		Variação B		Variação D	
Leq	% n° de fachadas	% de Área de fachada	% n° de fachadas	% de Área de fachada	% de fachadas	% Área de fachada
< 35 dB(A)	30,3%	26,0%	50%	41,2%	12,5%	8,1%
35-45 dB(A)	12,5%	9,0%	0,0%	0,0%	25,0%	28,4%
45-55 dB(A)	18,7%	12,5%	0,0%	0,0%	25,0%	9,0%
>55 dB(A)	37,5%	52,4%	50%	58,8%	37,5%	54,5%

A variação A, apesar de ter 52,4% de área de fachada exposta à classe de exposição superior a 55 dB(A), tem também 26,0% da sua área exposta a níveis mais baixos, isto é, à classe de exposição inferior a 35 dB(A). As restantes fachadas estão expostas a níveis intermédios de exposição ao ruído.

A variação B consegue proporcionar 41,2% de área das suas fachadas exposta à classe mais baixa de ruído, e daí maximizar a criação de fachadas calmas (sombreamento acústico). No entanto, possui 58,8% da sua área de fachada exposta à classe de exposição mais gravosa (>superiores a 55 dB(A)). Por outro lado, a variação D, apresenta numa forma distribuída, fachadas expostas a várias classes de ruído. Possui somente 8% de fachada calma, no entanto, 54,5% da sua área de fachada encontra-se exposta a classes de ruído superiores a 55 dB(A).

A variação B, associada a uma distribuição do layout (ocupação no seu interior) do edifício apropriada, constitui provavelmente a melhor solução. Nesta variação seria de sugerir as ocupações mais sensíveis para as fachadas mais calmas e ocupações menos sensíveis, tais como as cozinhas, corredores e banhos, virados para as fachadas mais expostas.

Em todas as variações (A, B, C, D e E) o comportamento em termos de ruído ao longo dos pisos (análise em altura) é similar, isto é, os valores diminuem à medida em que o ruído se propaga em altura. Existe sobretudo nas fachadas diretamente expostas à fonte de ruído, um ligeiro aumento dos valores do 1º piso relativamente ao r/c (devido ao formato da frente de onda acústica). Na análise de sensibilidade, foi possível averiguar que o comportamento do edificado, face à exposição ao ruído, é influenciado pela envolvente da forma urbana.

O comportamento, em termos de exposição solar das cinco variações, tem tendência a aumentar à medida que se sobe em altura, sobretudo pelo facto de que à medida em que se sobe há uma tendência na redução de obstáculos (obstrução solar), dado pelo ângulo de influência dos 45° entre edificações implementada pela regulamentação portuguesa. Em termos práticos, como já referido, esta obstrução traduz-se em valores menores nos r/c e 1º pisos dos edifícios devido ao acesso e restrição de exposição solar. Na estação de inverno (a análise de sensibilidade simulou o pior cenário, isto é, para o dia mais pequeno do ano, o solstício de inverno), este comportamento ainda se torna mais evidente, devido à altura do sol, que “anda mais baixo” e faz com que, comparativamente, os pisos mais baixos, relativamente aos últimos andares recebam menos radiação.

Após a análise de sensibilidade pode-se concluir que subir em altura é benéfico, quer em termos de exposição ao ruído quer em exposição solar. O objetivo das soluções ótimas e sustentáveis na edificação é obter a maior exposição solar que for possível, sobretudo no inverno, para reduzir a necessidades de aquecimento. O sombreamento solar deve ser evitado, e como foi possível constatar, as formas urbanas com pátios, promovem sombreamento acústico, mas também solar.

Como integrar os requisitos acústicos (proteção ao ruído) nas exigências de exposição solar dos regulamentos térmicos?

A análise do caso de boas práticas (o regulamento francês- Capítulo 5), permitiu responder a um dos objetivos específicos do estudo, ao analisar os parâmetros e as relações de compromisso térmico-acústico. Foi verificado que é na classificação de vão perante a distância da fonte de ruído e pela categoria da infraestrutura que é dada a integração dos requisitos acústicos através duma classificação (BR).

O impacto desta classificação no regulamento térmico, depreende-se pela necessidade de isolamento do vão envidraçado e pela necessidade de arrefecimento do edificado em análise. Foi possível também verificar que é através da atribuição do coeficiente CE1 ou CE2, que o governo francês estabelece um compromisso entre a classificação de ruído (BR), o tipo de uso (habitação, escritório, outros ...) e a zona climática (H1, H2e H3) (ver Tabela 60).

Qual a relação de compromisso entre requisitos térmico-acústicos na sustentabilidade da forma urbana?

As soluções de compromisso podem ser consideradas sustentáveis e de boas práticas e poderiam ser úteis implementar em Portugal, se pelo menos ao refletir sobre as premissas, as condicionantes e os objetivos pretendidos com a mesma fossem considerados em cada análise de projeto e houvesse um estudo de impacto quando essa análise não é considerada. Nomeadamente, considerar o impacto que a exposição ao ruído tem direta e indiretamente nos vãos, sobretudo nos envidraçados e como esta exposição tem impacto na necessidade de isolamento ou redução de exposição ao ruído.

Se considerarmos como solução passiva a integração de pátios ou outros elementos redutores de exposição ao ruído nas novas edificações e, simultaneamente, promover fachadas a sul livres de obstáculos, estas propostas podem permitir uma redução de gastos energéticos, tanto no aquecimento e arrefecimento como na necessidade de isolamento adicional. Além disso, é essencial avaliar como a exposição ao ruído afeta os vãos envidraçados, uma vez que o isolamento acústico pode reduzir a entrada de ruído, mas também limitar a entrada de radiação solar, exigindo um equilíbrio entre proteção e permeabilidade.

Nas edificações pré-existentes e consolidadas, torna-se fundamental ponderar onde aplicar isolamento acústico e térmico, garantindo um compromisso entre conforto e eficiência energética. Para minimizar a exposição ao ruído, é recomendável evitar a colocação de aberturas voltadas para vias de tráfego mais ruidosas, bem como distribuir as ocupações mais sensíveis para as fachadas mais calmas, enquanto espaços menos sensíveis, como cozinhas, corredores e banhos, podem ser orientados para as fachadas mais expostas.

O presente estudo apresenta algumas limitações não menosprezáveis, a abrangência é um ponto limitativo, na medida em que, não tendo a pretensão de ser um manual de soluções tipo, não é possível contemplar todas as tipologias e respectivas variantes e conflitos.

Por se considerar que não existem tipologias universais e transponíveis também não existem soluções ideais aplicáveis a qualquer caso específico, mas pode-se incentivar no modo como estas correlações podem ser introduzidas, desde logo na fase de conceção.

Nessa perspetiva, uma forma urbana mais sustentável necessita que, desde a fase de projeto se considere a compatibilização térmico-acústica de forma a minimizar os gastos energéticos, aumentar os ganhos passivos compatibilizando com a minimização da exposição ao ruído.

8. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O estudo de soluções passivas para a redução de ruído e a promoção da eficiência energética nas cidades revela-se essencial no contexto da descarbonização em Portugal. Estimular o arrefecimento e o aquecimento passivo das habitações é uma oportunidade de estudo válida e urgente, contribuindo para a sustentabilidade do setor habitacional.

Criar condições para a eficiência energética dos edifícios e para a descarbonização das habitações representa um desafio, tanto do ponto de vista legislativo como no que se refere à criação de incentivos que viabilizem a implementação de boas práticas. A necessidade de adotar novas abordagens na arquitetura e na construção civil é evidente, exigindo também um esforço de sensibilização junto das indústrias, especialmente na construção civil.

Além da eficiência energética e da circularidade, é fundamental promover uma mudança de paradigmas, repensando métodos de construção e destacando os benefícios práticos dessa transformação. Em desenvolvimentos futuros, após a análise dos resultados deste estudo, será pertinente aprofundar outras soluções passivas que contribuam simultaneamente para a redução de ruído e para a melhoria do desempenho energético das habitações.

Entre as soluções passivas a considerar, a otimização da orientação solar dos edifícios e a maximização da ventilação natural contribuem significativamente para a regulação térmica dos espaços interiores. Além disso, deverão ser também ponderados o uso de materiais de construção sustentáveis e de elevada inércia térmica, capazes de reduzir a necessidade de aquecimento e arrefecimento artificial. A incorporação de fachadas ventiladas, coberturas verdes e sombreamento estratégico pode melhorar o conforto térmico e reduzir o consumo energético.

A descarbonização do setor da construção exige ainda uma abordagem integrada que envolva tanto a reabilitação energética de edifícios existentes como a aplicação de soluções bioclimáticas em novas construções.

A promoção de sistemas de captação e reutilização de águas pluviais, bem como a integração de fontes de energia renovável, como painéis fotovoltaicos e sistemas solares térmicos, são passos fundamentais para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e minimizar a pegada carbónica dos edifícios.

A adoção destas estratégias não só favorece a eficiência energética e o conforto dos utilizadores, mas também contribui para um ambiente urbano mais sustentável e resiliente. A implementação de políticas públicas que incentivem o uso de soluções passivas e promovam a descarbonização da habitação é essencial para que estas práticas se tornem a norma e não a exceção, garantindo uma construção mais sustentável para as gerações futuras.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Energia (ADENE). (2021). <https://www.adene.pt/>
- Agência Portuguesa do Ambiente, A. (2004). *O Ruído e a Cidade*. Instituto do Ambiente. https://apambiente.pt/_zdata/DAR/Ruido/o_rudo_e_a_cidade.pdf
- Agência Portuguesa do Ambiente, D. de G. A., & Ruído, D. de G. do A. e. (2023). *Diretrizes para elaboração de mapas de ruído - métodos CNOSSOS-EU*.
- Ahvenniemi, H., Huovila, A., Pinto-Seppä, I., & Airaksinen, M. (2017). What are the differences between sustainable and smart cities? *Cities*. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.09.009>
- Akbari, H., Levinson, R., & Stern, S. (2008). Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies. *Solar Energy*, 82(7), 648–655. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.01.001>
- Aksamija, A. (2015). Design methods for sustainable, high-performance building facades. *Advances in Building Energy Research*, 10(2), 240–262. <https://doi.org/10.1080/17512549.2015.1083885>
- Alagoz, M; Beyhan, F. (2020). Methods to Discover the Optimum Building Envelope in the Context of Solar Data. *Gazi University Journal of Science*, 33(2), 318–340. <https://doi.org/10.35378/gujs.553389>
- Albino, V., Berardi, U., & Dangelico, R. M. (2015). Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives. *Journal of Urban Technology*. <https://doi.org/10.1080/10630732.2014.942092>
- Al-Ghezi, M. K., Ahmed, R. T., & Chaichan, M. T. (2022). The Influence of Temperature and Irradiance on Performance of the photovoltaic panel in the Middle of Iraq. *International Journal of Renewable Energy Development*, 11(2), 501–513. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/ijred.2022.43713>
- Al-Sallal, K. A. (1996). Solar access/shading and building form: Geometrical study of the traditional housing cluster in Sana'a. *Renewable Energy*, 8(1–4), 331–334. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88872-0](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88872-0)
- American Society for Testing and Materials. (2023). Standard Practice for Field Use of Pyranometers, Pyrhemometers and UV Radiometers (ASTM - G183).
- American Society for Testing and Materials. (2023). *Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field 1* (ASTM E1918-21). <https://www.astm.org/e1918-21.html>
- Analysis SOL-AR- (2023, abril 5). <https://labeee.ufsc.br/downloads/softwares/analysis-sol-ar>
- Angelidou, M. (2014). Smart city policies: A spatial approach. *Cities*. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2014.06.007>
- ArcGIS Spatial Analyst -Solar Analysis. (2023, abril 5). <https://www.esri.com/software/arcgis/extensions/spatialanalyst/key-features/solar>
- Ariza-Villaverde, A. B., Jiménez-Hornero, F. J., & Gutiérrez De Ravé, E. (2014). Influence of urban morphology on total noise pollution: Multifractal description. *Science of The Total Environment*, 472, 1–8. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2013.10.091>
- Arrêté du 29 novembre 2000 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments - Légifrance (Annexe II-RT2000) (2000).
- Arrêté du 28 décembre 2012 La ministre de l'égalité des territoires et du logement et la ministre de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (Article Annexe II - relatif

- aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments non visés à l'article 2 du décret du 26 octobre 2010. (2012). Légifrance.
<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000026871753>
- Arrêté du 30 mai 1996 relatif aux modalités de classement des infrastructures de transports terrestres et à l'isolement acoustique des bâtiments d'habitation dans les secteurs affectés par le bruit - Légifrance (1996).
- Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., Ouzounis, G., & Portugali, Y. (2012). Smart cities of the future. *European Physical Journal: Special Topics*. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3>
- Belakehal, A., & Aoul, K. T. (1996). Shading and shadowing: Concepts for an interactive strategy between solar control and aesthetics in the design of the facade. Reference to arid zones. *Renewable Energy*, 8(1–4), 323–326. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88870-7](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88870-7)
- Belakehal, A., & Tabet, A. K. (2000). Experimental assessment of shading and shadowing strategy, case of facade's cantilevered volumes. Reference to dwellings in arid lands. *International Journal of Ambient Energy*, 21(4), 179–186. <https://doi.org/10.1080/01430750.2000.9675372>
- Ben Letaifa, S. (2015). How to strategize smart cities: Revealing the SMART model. *Journal of Business Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2015.01.024>
- Bennion, M., & O'Neill, W. (1994). Building transportation analysis zones using Geographic Information Systems. *Transportation Research Record*, 1429, 9-56.
- Benocci, R., Bisceglie, A., Angelini, F., & Zambon, G. (2020). Influence of traffic noise from local and surrounding areas on high-rise buildings. *Applied Acoustics*, 166, 107362. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107362>
- Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2017). Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. *Sustainable Cities and Society*, 31, 183–212. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2017.02.016>
- Borrego, C., Martins, H., Tchepel, O., Salmim, L., Monteiro, A., & Miranda, A. I. (2006). How urban structure can affect city sustainability from an air quality perspective. *Environmental Modelling & Software*, 21(4), 461–467. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2004.07.009>
- Bourbia, F., & Awbi, H. B. (2004). Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate: Part 2: Shading simulations. *Renewable Energy*, 29(2), 291–301. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00171-X](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00171-X)
- Brito, M. C., Redweik, P., Catita, C., Freitas, S., & Santos, M. (2019). 3D Solar Potential in the Urban Environment: A Case Study in Lisbon. *Energies 2019, Vol. 12, Page 3457, 12*(18), 3457. <https://doi.org/10.3390/EN12183457>
- Bulkeley, H., & Betsill, M. M. (2005). Rethinking sustainable cities: Multilevel governance and the «urban» politics of climate change. *Environmental Politics*, 14(1), 42–63. <https://doi.org/10.1080/0964401042000310178>
- Calleri, C., Manca, R., Shtrepi, L., & Astolfi, A. (2017). Building façades optimization at preliminary design stage for outdoor noise mitigation. *Euronoise, ss*, 2427–2434.
- Capeluto, I., Yezioro, A., Bleiberg, T., IBPSA, E. S.-9th I., & 2005, U. (2005). From computer models to simple design tools: Solar rights in the design of urban streets. *9th International IBPSA Conference, Montreal, Canada*, 15–18.

- Caragliu, A., del Bo, C., & Nijkamp, P. (2011). Smart cities in Europe. *Journal of Urban Technology*. <https://doi.org/10.1080/10630732.2011.601117>
- Carneiro, C., Morello, E., Desthieux, G., & Golay, F. (2010). Urban environment quality indicators: application to solar radiation and morphological analysis on built area. *Proceedings of the 3rd WSEAS international conference on Visualization, imaging and simulation*, 141–148.
- Carreira, R. (2017). *Determinação de fatores de sombreamento com recurso a modelos 3D*. [Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências- Universidade de Lisboa]. Repositório da Universidade de Lisboa. <http://hdl.handle.net/10451/32041>
- Cascone, Y., Corrado, V., & Serra, V. (2011). Calculation procedure of the shading factor under complex boundary conditions. *Solar Energy*, 85(10), 2524–2539. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.07.011>
- Castro, E. A. de, Santinha, G. de S., & Marques, T. M. V. de S. C. N.-B. A. 31049 V.; B. A. 31049 V. (2008). Cidades inteligentes, governação territorial e tecnologias de informação e comunicação. Em *Política de cidades* (Vol. 2). DGOTDU,.
- Cavaco, C. (Coord.). (2015), Cidades Sustentáveis 2020. Lisboa: Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia e Direção Geral do Território.
- Chastenot, C. A. de, Belziti, D., Bessis, B., Fauchoux, F., Le Sceller, T., Monaco, F. X., & Pech, P. (2016). The French eco-neighbourhood evaluation model: Contributions to sustainable city making and to the evolution of urban practices. Em *Journal of Environmental Management* (Vol. 176, pp. 69–78). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.036>
- Chatzipoulka, C., Compagnon, R., & Nikolopoulou, M. (2016). Urban geometry and solar availability on façades and ground of real urban forms: using London as a case study. *Solar Energy*, 138, 53–66. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2016.09.005>
- Cheng, V., Steemers, K., Montavon, M., & Compagnon, R. (2006). Urban Form, Density and Solar Potential. *PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*,. Climate.OneBuilding.(2023,Mai05). https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/PRT_Portugal/index.html
- Code de la construction et de l'habitation (Annexes (Articles Annexe à l'article R172-4 à Annexe à l'article D453-8). (2023,maio 5).Légifrance. <https://www.legifrance.gouv.fr/codes/id/LEGISCTA0000006108629>
- Coelho, A. (1993). *Análise e avaliação da qualidade arquitectónica residencial, Volume III – Níveis físicos do habitat, tipologias gerais e caracterização sistemática*. (LNEC, Ed.).
- Cohen, B. (2006). Urbanization in developing countries: Current trends, future projections, and key challenges for sustainability. *Technology in Society*, 28(1–2), 63–80. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2005.10.005>
- Costa, J. M. S. da. (2016). Avaliação do potencial de otimização do comportamento termo-energético de edifícios residenciais. [Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho].Repositório da Universidade do Minho. <https://hdl.handle.net/1822/49816>
- Coutinho, H. M. S. (2018). Relação entre a forma urbana e a radiação solar nos edifícios. [Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e do Ambiente, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Viana do Castelo]. Repositório Científico IPVC. <http://hdl.handle.net/20.500.11960/2056>
- Curreli, A., & Roura, H. C. (2010). *Solar access in the compact city: a study case in Barcelona*.

- Dagher, S., Akhozheya, B., & Slimani, H. (2022). Energy analysis studying the effect of solar shading on daylight factors and cooling hours in an extreme weather. *Energy Reports*, 8, 443–448. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.10.231>
- David, S. L. (2015). «*NET ZERO BUILDINGS*»: *Aplicação do conceito a um edifício existente* [Artigo. Instituto Superior Politécnico Gaya]. https://www.academia.edu/107878415/_Net_Zero_Buildings_Aplica%C3%A7%C3%A3o_Do_Conceito_a_Um_Edif%C3%ADcio_Existente
- De Jong, M., Joss, S., Schraven, D., Zhan, C., & Weijnen, M. (2015). Sustainable-smart-resilient-low carbon-eco-knowledge cities; Making sense of a multitude of concepts promoting sustainable urbanization. *Journal of Cleaner Production*, 109, 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.004>
- Decreto-Lei N° 49/90 Regulação das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). (1990). Diário da República N°. 31/1990, Series I 1990-02-06 (1990). <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/40-1990-334611>
- Decreto-Lei N° 79/2006 (RSECE). (2006). Diário da República n.º 67/2006, Série I-A de 2006-04-04. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/79-2006-672459>
- Decreto-Lei N° 80/2006 Regulação das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). (2006). Diário da República n.º 67/2006, Série I-A de 2006-04-04. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/80-2006-672456>
- Decreto-Lei N° 118/2013 (SCE, REH, RECS). (2013). Diário da República n.º 159/2013, Série I de 2013-08-20. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/118-2013-499237>
- Décret n° 2010-1269 (2010). Légifrance. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000022959342>
- Décret n°95-21. (1995). Légifrance. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000732867>
- Décret n° 2012-111. (2012). Légifrance. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000025208972>
- Decreto-Lei n° 9/2007. (2007). Diário da República n.º 12/2007, Série I de 2007-01-17. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/9-2007-522807>
- Dekay, M., & Brown, G. Z. (2014). *Sun, Wind, and Light: Architectural Design Strategies*. John Wiley & Sons Inc.
- Department of Transport and Welsh Office. (1988). *Calculation of Road Traffic Noise* (HMSO, Ed.). <https://n-somerset.gov.uk/sites/default/files/2022-11/CD13.02%20Department%20of%20Transport%20and%20Welsh%20Office%20%281988%29.%20Calculation%20of%20Road%20Traffic%20Noise..pdf>
- Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013 do Ministério da Economia e do Emprego. (2013). Diário da República: 2.ª série, N.º 234, 35088-(58)-35088-(87). <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/despacho-extrato/15793-k-2013-2975224>
- Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013 do Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia - Direção-Geral de Energia e Geologia (2013). Diário da República n.º 234/2013, 3º Suplemento, Série II de 2013-12-03. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/despacho-extrato/15793-e-2013-2975218>
- Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013 do Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia - Direção-Geral de Energia e Geologia (2013). Diário da República n.º. 234/2013, 3º Suplemento, Série II de 2013-12-03. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/despacho-extrato/15793-k-2013-2975224>

- DGEG. (2023). *Balanço Energético Provisório 2021*. Estatística. <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/balancos-energeticos/balancos-energeticos-nacionais/>
- Diário da República, 2.ª série — N.º 234 — 3 de dezembro de 2013 Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013 (2013).
- Diretiva 2002/49/CE. (2002). Jornal Oficial da União Europeia. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0049>
- Diretiva 2010/31/EU. (2010). Jornal Oficial da União Europeia. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031>
- Diretiva 2002/91/CE. (2002). Jornal Oficial da União Europeia. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32002L0091>
- Diretiva Delegada (UE) 2021/1226. (2021). Jornal Oficial da União Europeia. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/ALL/?uri=CELEX:32021L1226>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
- Echevarria Sanchez, G. M., Van Renterghem, T., Thomas, P., & Botteldooren, D. (2016). The effect of street canyon design on traffic noise exposure along roads. *Building and Environment*, 97, 96–110. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.11.033>
- El Dien, H. H., & Woloszyn, P. (2005). The acoustical influence of balcony depth and parapet form: experiments and simulations. *Applied Acoustics*, 66(5), 533–551. <https://doi.org/10.1016/J.APACoust.2004.09.004>
- El Dien, H., & Woloszyn, P. (2004). Prediction of the sound field into high-rise building facades due to its balcony ceiling form. *Applied Acoustics*, 65(4), 431–440. <https://doi.org/10.1016/J.APACoust.2003.11.002>
- Emmanuel, R. (1993). A Hypothetical ‘Shadow Umbrella’ for Thermal Comfort Enhancement in the Equatorial Urban Outdoors. *Architectural Science Review*, 36(4), 173–184. <https://doi.org/10.1080/00038628.1993.9696759>
- EnergyPlus. (2024, maio 5). *Climate Calculations: Engineering Reference — EnergyPlus 8.9*. <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-9/engineering-reference/climate-calculations.html>
- ENVI-met. (2024, maio 5). <https://envi-met.com>
- Ferreira, S. (2016). *Impacte da nova regulamentação na certificação energética de edifícios*. [Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia, Universidade do Algarve]. Repositório da Universidade do Algarve. <http://hdl.handle.net/10400.1/8448>
- European Commission. (2012). *Smart cities / European Commission*. https://ec.europa.eu/info/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities_en
- European Commission. (2018a). *2050 long-term strategy / Climate action*. European Commission. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_pt
- European Commission. (2018b). *Sustainable urban development*. https://ec.europa.eu/commission/news/sustainable-urban-development-2018-feb-09_en
- European Commission. (2010). *EUROPE 2020: A European strategy for smart, sustainable and inclusive growth*. Communication from the commission.

- [https://ec.europa.eu/eu2020/pdf/COMPLET_EN_BARROSO_007 - Europe 2020 - EN version.pdf](https://ec.europa.eu/eu2020/pdf/COMPLET_EN_BARROSO_007_-_Europe_2020_-_EN_version.pdf)
- Frota, A. B., & Schiffer, S. R. (Ed.) (2001). *Manual de conforto térmico*. Studio Nobel.
- Galster, G., Hanson, R., Ratcliffe, M. R., Wolman, H., Coleman, S., & Freihage, J. (2001). *Wrestling Sprawl to the Ground: Defining and Measuring an Elusive Concept*.
- Gardner, G. (2016). Imagining a Sustainable City. Em *State of the World* (pp. 3–9). Island Press/Center for Resource Economics. https://doi.org/10.5822/978-1-61091-756-8_1
- Garreau, E., Berthou, T., Duplessis, B., Partenay, V., & Marchio, D. (2021). Solar shading and multi-zone thermal simulation: Parsimonious modelling at urban scale. *Energy and Buildings*, 249, 111176. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111176>
- Gerges, S. N. Y. (1992). *Ruído: Fundamentos e Controle* (Biblioteca Universitaria Feder, Ed.).
- Givoni, Baruch. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. Van Nostrand Reinhold.
- Gonçalves, H., & Graça, J. M. (2004). *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*. DGGE / IP-3E. <https://core.ac.uk/download/pdf/70658245.pdf>
- Gosol. (2023, abril 5). <http://www.gosol.de/gosol-software.html>
- Grifoni, RC; Lapucci, D Petrucci; Prenna, E. (2016). Method to define a solar energy platform for historical city centers and identification of new scenarios for sustainability. *IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*.
- Guedes, I. C. M., Bertoli, S. R., & Zannin, P. H. T. (2011). Influence of urban shapes on environmental noise: A case study in Aracaju — Brazil. *Science of The Total Environment*, 412–413, 66–76. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.10.018>
- Hamidi, S., Ewing, R., Preuss, I., & Dodds, A. (2015). Measuring Sprawl and Its Impacts: An Update. *Journal of Planning Education and Research*, 35(1), 35–50. <https://doi.org/10.1177/0739456X14565247>
- Hannah, L. (2006). Ground, Terrain and Structure Effects on Sound Propagation. *Massey University New Zealand Acoustics*, Vol. 2/ #.
- Harrison, D. C., Seah, W. K. G., & Rayudu, R. K. (2015). Coverage preservation in energy harvesting wireless sensor networks for rare events. *2015 IEEE 40th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, 181–184.
- Heutschi, K. (1995). A simple method to evaluate the increase of traffic noise emission level due to buildings, for a long straight street. *Applied Acoustics*, 44(3), 259–274. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(94\)00027-S](https://doi.org/10.1016/0003-682X(94)00027-S)
- Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. *Geoscientific Model Development*, 15(14), 5481–5487. <https://doi.org/10.5194/GMD-15-5481-2022>
- Höjer, M., & Wang, J. (2014). Smart sustainable cities: Definition and challenges. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 310, 333–349. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_20
- Horicatcher -Meteonorm. (2023, abril 5). <https://meteonorm.com/en/product/horicatcher>
- Hornikx, M., & Forssén, J. (2009). Noise abatement schemes for shielded canyons. *Applied Acoustics*, 70(2), 267–283. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2008.04.002>
- Hornikx, M., Forssen, J., & Kropp, W. (2005). A scale model study of parallel urban street canyons. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(4), 2417–2417. <https://doi.org/10.1121/1.4786381>

- Huang, J., Lu, X. X., & Sellers, J. M. (2007). A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing. *Landscape and Urban Planning*, 82(4), 184–197. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.010>
- Hukseflux. (2023, maio 7). *What is a pyrheliometer?* / Hukseflux. <https://www.hukseflux.com/applications/solar-energy-pv-system-performance-monitoring/what-is-a-pyrheliometer>
- INE/DGEG/ADENE. (2021, janeiro 8). *Inquérito ao Consumo de Energia do Setor Doméstico 2020. Instituto Nacional de Estatística*. Direção Geral da Energia e Geologia. ADENE. https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=48433981&PUBLICACOESstema=00&PUBLICACOESmodo=2
- Instituto Nacional de Estatística (INE). (2021, janeiro 8). *Portugal 2021 Census*. https://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpgid=censos21_main&xpid=CENSOS21&xlang=pt
https://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpgid=censos21_main&xpid=CENSOS21&xlang=pt
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (2020). *Ficha Climatológica - 1971-2000 - Viana do Castelo*.
- International Organization for Standardization. (1990). *Solar energy — Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation* (ISO 9060:1990). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9060:ed-1:v1:en>
- IPMA (Instituto Português do Mar e do Atmosfera. (2023, março 6). *Área educativa - CLIMA DE PORTUGAL CONTINENTAL*. <https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima>
- Ismail, M. R., & Oldham, D. J. (2005). A scale model investigation of sound reflection from building façades. *Applied Acoustics*, 66(2), 123–147. <https://doi.org/10.1016/J.APACoust.2004.07.007>
- IZUBA énergies. (2024, maio 7). *Niveau Bâtiment dans l'arbre RE 2020 Energie / RT 2012*. https://docs.izuba.fr/v4/fr/index.php/Bâtiment_%28Arbre_RT2012%29
- Jamei, E., Rajagopalan, P., Seyedmahmoudian, M., & Jamei, Y. (2016). Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1002–1017. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.10.104>
- Janczur, R., Walerian, E., & Czechowicz, M. (2011). Façade shaping as local means protecting against traffic noise. *Acta Acustica united with Acustica*, 97(5), 769–778.
- Kämpf, J. H., & Robinson, D. (2010). Optimisation of building form for solar energy utilisation using constrained evolutionary algorithms. *Energy and Buildings*, 42(6), 807–814. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.11.019>
- Kanters, J., Gentile, N., & Bernardo, R. (2021). Planning for solar access in Sweden: routines, metrics, and tools. *Urban, Planning and Transport Research*, 9(1), 347–367. <https://doi.org/10.1080/21650020.2021.1944293>
- Karaman, Ö. A., Tanyıldızı Ağır, T., & Arsel, İ. (2021). Estimation of solar radiation using modern methods. *Alexandria Engineering Journal*, 60(2), 2447–2455. <https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2020.12.048>
- Keeler, M., & Burke, B. (2009). *Fundamentals of Integrated Design for Sustainable Building. How buildings use energy*.
- Kite, S. (2017). *Shadow-makers : a cultural history of shadows in architecture* (London: Bloomsbury Academic, Ed.). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5040/9781474205191>

- Kluzenaar, Y. de, Salomons, E. M., Janssen, S. A., van Lenthe, F. J., Vos, H., Zhou, H., Miedema, H. M. E., & Mackenbach, J. P. (2011). Urban road traffic noise and annoyance: The effect of a quiet façade. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(4), 1936–1942. <https://doi.org/10.1121/1.3621180>
- Knowles, R. (2006). *Ritual House: Drawing on Nature's Rhythms for Architecture and Urban Design*. Island Press.
- Knowles, R. L. (2003). The solar envelope: its meaning for energy and buildings. *Energy and Buildings*, 35(1), 15–25. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00076-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00076-2)
- Ko, Y. (2013). Urban Form and Residential Energy Use: A Review of Design Principles and Research Findings. *Journal of Planning Literature*, 28(4), 327–351. <https://doi.org/10.1177/0885412213491499>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Kramers, A., Höjer, M., Lövehagen, N., & Wangel, J. (2014). Smart sustainable cities - Exploring ICT solutions for reduced energy use in cities. *Environmental Modelling and Software*, 56, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.019>
- Kurze, U. J., & Anderson, G. S. (1971). Sound attenuation by barriers. *Applied Acoustics*, 4(1), 35–53. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(71\)90024-7](https://doi.org/10.1016/0003-682X(71)90024-7)
- Ladybug. (2023, abril 5). <https://www.ladybug.tools/>
- Levinson, R., Akbari, H., & Berdahl, P. (2010a). Measuring solar reflectance—Part I: Defining a metric that accurately predicts solar heat gain. *Solar Energy*, 84(9), 1717–1744. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2010.04.018>
- Levinson, R., Akbari, H., & Berdahl, P. (2010b). Measuring solar reflectance—Part II: Review of practical methods. *Solar Energy*, 84(9), 1745–1759. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2010.04.017>
- Levinson, R., Egolf, M., Chen, S., & Berdahl, P. (2020). Experimental comparison of pyranometer, reflectometer, and spectrophotometer methods for the measurement of roofing product albedo. *Solar Energy*, 206, 826–847. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2019.11.103>
- Li, X., & Yeh, A. G.-O. (2004). Analyzing spatial restructuring of land use patterns in a fast growing region using remote sensing and GIS. *Landscape and Urban Planning*, 69(4), 335–354. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2003.10.033>
- Longley, P. A., & Mesev, V. (2000). On the measurement and generalisation of urban form. *Environment and Planning A*, 32(3), 473–488. <https://doi.org/10.1068/a3224>
- Lopes, A. B. (2016). *Metodologia harmonizada de avaliação do comportamento térmico e desempenho energético de edifícios: estudo dos ganhos solares* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra]. Repositório da Universidade de Coimbra. <https://hdl.handle.net/10316/38729>
- Macke, J., Rubim Sarate, J. A., & de Atayde Moschen, S. (2019). Smart sustainable cities evaluation and sense of community. *Journal of Cleaner Production*, 239, 118103. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118103>
- Maekawa, Z. (1968). Noise reduction by screens. *Applied Acoustics*, 1(3), 157–173. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(68\)90020-0](https://doi.org/10.1016/0003-682X(68)90020-0)

- Magrini, A., & Lisot, A. (2016). A simplified model to evaluate noise reduction interventions in the urban environment. *Building Acoustics*, 23(1), 36–46. <https://doi.org/10.1177/1351010X16637527>
- Martin, C., Evans, J., Karvonen, A., Paskaleva, K., Yang, D., & Linjordet, T. (2019). Smart-sustainability: A new urban fix? *Sustainable Cities and Society*, 45, 640–648. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.028>
- Martins, T. A. de L., Adolphe, L., Bastos, L. E. G., & Martins, M. A. de L. (2016). Sensitivity analysis of urban morphology factors regarding solar energy potential of buildings in a Brazilian tropical context. *Solar Energy*, 137, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.053>
- McKenna, E., Krawczynski, M., & Thomson, M. (2015). Four-state domestic building occupancy model for energy demand simulations. *Energy and Buildings*, 96, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.013>
- Mendonça, P. (2005). *Habitar sob uma segunda pele - Estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados* [Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho]. Repositório da Universidade do Minho. <https://hdl.handle.net/1822/4250>
- Mendonça, P., & Bragança, L. (2007). Sustainable housing with mixed weight strategy—A case study. *Building and Environment*, 42(9), 3432–3443. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2006.08.025>
- Merline, M. A., & Vimalathithan, R. (2017). Smart city: Issues and research challenges in implementation. *2017 IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC)*, 263–266. <https://doi.org/10.1109/ICSGSC.2017.8038588>
- Metropolitan Acoustics. (2017, fevereiro 15). *Building Walls*. Metropolitan Acoustics. <https://metro-acoustics.com/2017/02/15/february-2017-newsletter-building-walls/>
- Ministère du Partenariat avec les territoires et de la Décentralisation. (2020, abril 23). *Acoustique et bâtiment*. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/acoustique-batiment>
- Montavon, M. (2010). *Optimisation of Urban Form by the Evaluation of the Solar Potential* [, THÈSE N O 4657 (2010), ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE] Dépôt de l'Université de Lausanne. <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/9c9dd388-6d78-4c02-a386-96dc13761c04>
- Murphy, K. (2012). The social pillar of sustainable development: A literature review and framework for policy analysis. *Sustainability: Science, Practice, and Policy*, 8(1), 15–29. <https://doi.org/10.1080/15487733.2012.11908081>
- Natanian, J., & Auer, T. (2018). Balancing urban density, energy performance and environmental quality in the Mediterranean: a typological evaluation based on photovoltaic potential. *Energy Procedia*, 152, 1103–1108. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.133>
- Nevens, F., Frantzeskaki, N., Gorissen, L., & Loorbach, D. (2013). Urban Transition Labs: co-creating transformative action for sustainable cities. *Journal of Cleaner Production*, 50, 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.001>
- Newman, P., & Jennings, I. (2008). *Cities as Sustainable Ecosystems Principles and Practices*.
- Niewianda, A., & Heidt, F. D. (1996). *Sombrero: a pc-tool to calculate shadows on arbitrarily oriented surfaces*. 58(6), 253–263.
- Öhrström, E., Skånberg, A., Svensson, H., & Gidlöf-Gunnarsson, A. (2006). Effects of road traffic noise and the benefit of access to quietness. *Journal of Sound and Vibration*, 295(1–2), 40–59. <https://doi.org/10.1016/J.JSV.2005.11.034>

- Oliveira, M. (2011). *A influência da forma urbana na propagação do ruído urbano*. [Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana, Escola de Engenharia, Universidade do Minho]. Repositório da Universidade do Minho. <https://hdl.handle.net/1822/17588>
- Oliveira, M. & Silva, L. T. (2010). How urban noise can be influenced by the urban form. *8th WSEAS International Conference on Environment, Ecosystems and Development (EED'10)*, 31–36.
- Oliveira, M., & Silva, L. (2011). The influence of urban form in urban noise propagation. , *INTERNATIONAL JOURNAL of ENERGY and ENVIRONMENT*, 5(3), 356–363.
- Oliveira, M., & Silva, L. (2012). Urban form as environmental noise indicators. *41st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2012, INTER-NOISE 2012*.
- Oliveira, M., Silva Lopes, H., Mendonça, P., Tenpierik, M., & Silva, L. T. (2024). Solar Radiation Measurement Tools and Their Impact on In Situ Testing—A Portuguese Case Study. *Buildings* 2024, Vol. 14, Page 2117, 14(7), 2117. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS14072117>
- Onaga, H., & Rindel, J. H. (2007). Acoustic characteristics of urban streets in relation to scattering caused by building facades. *Applied Acoustics*, 68(3), 310–325. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2006.01.010>
- Palma, P., Gouveia, J. P., & Climaco, N. (2023). *Viabilidade da descarbonização dos edifícios residenciais – desafios e propostas no contexto de Portugal*.
- Papa, R., Galderisi, A., Vigo Majello, M. C. ;, & Saretta, E. (2015). Smart and Resilient Cities. A Systemic Approach for Developing. *TeMA Journal of Land Use, Mobility and Environment, I(Cities, Energy and Climate Change (1))*, 1–49. <https://doi.org/10.6092/1970-9870/2883>
- Paulescu, M., Paulescu, E., Gravila, P., & Badescu, V. (2013). Weather Modeling and Forecasting of PV Systems Operation. *Green Energy and Technology*, 103. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4649-0/COVER>
- Pedro, J. (1999). *Programa habitacional: vizinhança próxima* (Informações Científicas e Técnicas de Arquitectura; ITA 7). LNEC.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 4, 439–473.
- Pereira, M. da L. V. (1982). *Definição da forma urbana no planeamento físico*. LNEC.
- Picaud, J., & Scouarnec, D. (2009). Using acoustic diffusors to reduce noise in urban areas. Em *Acta Acustica united with Acustica*, 95(4),.
- Picaud, J., & Simon, L. (2001). A scale model experiment for the study of sound propagation in urban areas. *Applied Acoustics*, 62(3), 327–340. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00028-1)
- Portaria nº 42/2023 de Economia e Mar, Ambiente e Ação Climática, Infraestruturas e Coesão Territorial.(2023).Diário da República n.º 29/2023, Série I de 2023-02-09. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/42-2023-207229678>
- Priyadarshinee, P., Lim, K. M., & Lee, H. P. (2018). Fractal diffusers as noise barrier top-edge devices. *Journal of Physics: Conference Series*, 12032. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1075/1/012032>
- Quan, S. J., Economou, A., Grasl, T., & Yang, P. P. J. (2014). Computing energy performance of building density, shape and typology in urban context. *Energy Procedia*, 61, 1602–1605. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.181>

- Rathe, E. J. (1969). Note on two common problems of sound propagation. *Journal of Sound and Vibration*, 10(3), 472–479. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(69\)90225-9](https://doi.org/10.1016/0022-460X(69)90225-9)
- Ratti, C., Raydan, D., & Steemers, K. (2003). Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*, 35(1), 49–59. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00079-8)
- Règlementation Thermique des Bâtiments Existants -Fiche d'application : Classement au bruit des baies : BR1 BR2 BR3 (2023, abril 8). https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/20160425_existant_classement_au_bruit_d_une_baie.pdf
- Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU). (1951). Diário do Governo n.º 166/1951, 1º Suplemento, Série I de 1951-08-07. <https://diariodarepublica.pt/dr/legislacao-consolidada/decreto-lei/1951-120610500>
- Rode, P., Keim, C., Robazza, G., Viejo, P., & Schofield, J. (2014a). Cities and energy: Urban morphology and residential heat-energy demand. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 41(1), 138–162. <https://doi.org/10.1068/b39065>
- Rode, P., Keim, C., Robazza, G., Viejo, P., & Schofield, J. (2014b). Cities and energy: Urban morphology and residential heat-energy demand. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 41(1), 138–162. <https://doi.org/10.1068/b39065>
- Rodrigues, A. J. da C. (2013). *Barreiras Acústicas, uma solução para controlar o ruído em meio urbano* [Dissertação de Mestrado integrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho]. Repositório da Universidade do Minho. <https://hdl.handle.net/1822/30644>
- RT-2012.com. (2023, maio 8). *Coefficient CE1 ou CE2 ? Comment et quand les appliquer ?* <https://www.rt-2012.com/actualites/technique/coefficient-ce1-ce2-rt-2012/>
- Ryerson, C. C. (1984). Mapping solar access in high relief areas for regional energy planning. *Professional Geographer*, 36(3), 345–352. <https://doi.org/10.1111/J.0033-0124.1984.00345.X>
- Sachs, J. D.(Ed). (2013). *The Age of Sustainable Development*. Columbia University Press.
- Salazarli Trujillo, J. H. (1998). Solar Performance and Shadow Behaviour in Buildings. Case Study with Computer Modelling of a Building in Loranca, Spain. *Building and Environment*, 33(2–3), 117–130. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(97\)00027-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(97)00027-9)
- Sanches, S. P. (1997). Definição de zonas de tráfego, a partir de setores censitários usando um SIG,. *Anpet – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*.
- Sari, D. P., & Laksana, P. J. B. (2020). Optimization building performance in early design stage using integrated dynam-ic model. *MODUL*, 20(2), 151–156. <https://doi.org/10.14710/MDL.20.2.2020.151-156>
- Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A. (2009). The Research Onion. Em *Slides of University of Pretoria* (pp. 1–10). <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Shading Analysis. (2023, maio 2). <https://www.pvresources.com/en/siteanalysis/shadinganalysis.php>
- ShadowFX - sun and shadow analysis. (2023, maio 2). <http://www.shadowfx.com/>
- Shukla, K. N., Rangnekar, S., & Sudhakar, K. (2015). Comparative study of isotropic and anisotropic sky models to estimate solar radiation incident on tilted surface: A case study for Bhopal, India. *Energy Reports*, 1, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2015.03.003>

- Silva, B. N., Khan, M., & Han, K. (2018). Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 38, 697–713. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.053>
- Silva, A. P. D. da. (2009). *Eficiência energética de edifícios localizados no concelho de Évora: estudo de caso* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil Universidade Évora]. Repositório da Universidade Évora. <http://hdl.handle.net/10174/13004>
- Silva, J. J. C. da, & Henriques, P. M. C. (2012). *Proposta de nova metodologia para o cálculo do fator de sombreamento de vãos envidraçados por elementos horizontais [Artigo de Conferência]*. Congresso Construção 2012. Coimbra. <https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/8279/1/ID186.pdf>
- Silva, L. (2009). *Sebenta de Apoio à disciplina Gestão Ambiental Urbana* (D. E. C. Universidade do Minho, Ed.).
- Silva, L. T. (2007). *Avaliação da qualidade ambiental urbana* [Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho]. Repositório da Universidade do Minho. <https://hdl.handle.net/1822/7515>
- Silva, L. T., Fonseca, F., Rodrigues, D., & Campos, A. (2018). Assessing the influence of urban geometry on noise propagation by using the sky view factor. *Journal of Environmental Planning and Management*, 61(3), 535–552. <https://doi.org/10.1080/09640568.2017.1319804>
- Silva, L. T., & Mendes, J. F. G. (2012). City Noise-Air: An environmental quality index for cities. *Sustainable Cities and Society*, 4(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2012.03.001>
- Silva, L. T., Oliveira, M., & Silva, J. F. (2014a). Urban form indicators as proxy on the noise exposure of buildings. *Applied Acoustics*, 76, 366–376. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.07.027>
- Silva, L. T., Oliveira, M., & Silva, J. F. (2014b). Urban form indicators as proxy on the noise exposure of buildings. *Applied Acoustics*, 76, 366–376. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.07.027>
- Sneddon, C., Howarth, R. B., & Norgaard, R. B. (2006). Sustainable development in a post-Brundtland world. *Ecological Economics*, 57(2), 253–268. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.04.013>
- Solar Pathfinder - Solar site analysis*. (2023, maio 2). <https://www.solarpathfinder.com/>
- Solmetric. *SunEye 210 Shade Tool*. (2023, abril 5). <https://www.solmetric.com/product/suneye-210-shade-tool/>
- Souza, L. C. L. de, & Giunta, M. B. (2011). Urban indices as environmental noise indicators. *Computers, Environment and Urban Systems*, 35(5), 421–430. <https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2011.06.001>
- Steeners, K., Baker, N., Crowther, D., Dubiel, J., & Nikolopoulou, M. (1998). Radiation absorption and urban texture. *Building Research & Information*, 26(2), 103–112. <https://doi.org/10.1080/096132198370029>
- Strømman-Andersen, J., & Sattrup, P. A. (2011a). The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains. *Energy and Buildings*, 43(8), 2011–2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.007>
- Strømman-Andersen, J., & Sattrup, P. A. (2011b). The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains. *Energy and Buildings*, 43(8), 2011–2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.007>
- Sunhoursplugin. (2023, abril 5). Sunhoursplugin .<https://www.sunhoursplugin.com/>

- Taleghani, M., Kleerekoper, L., Tenpierik, M., & van den Dobbelsteen, A. (2015). Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and Environment*, 83, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.014>
- Taleghani, M., Tenpierik, M., Van Den Dobbelsteen, A., & De Dear, R. (2013). Energy use impact of and thermal comfort in different urban block types in the Netherlands. *Energy and Buildings*, 67, 166–175. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.024>
- Torrens, P. M., & Alberti, M. (2002). Measuring Sprawl. *Working Paper No. 27, Centre for Advanced Spatial Analysis*.
- TownScope. (2023, abril 5). <http://www.townscope.com/>
- Tsai, Y. H. (2005). Quantifying urban form: Compactness versus «sprawl». *Urban Studies*, 42(1), 141–161. <https://doi.org/10.1080/0042098042000309748>
- UN. (2023, abril 5). *The New Urban Agenda - Habitat III*. <http://habitat3.org/the-new-urban-agenda>
- United Nations Development Programme (UNDP). (2023, abril 3). *Strategic Plan 2022–2025 / UNDP*. <http://strategicplan.undp.org/>
- United Nations Development Programme (UNDP). (2023, abril 3). *Development Goals / United Nations Development Programme*. https://www.undp.org/sustainable-development-goals/no-poverty?gclid=Cj0KCQjw8qmhBhCIARIsANAtbocj8aG68B-d87eYIHISgR-05thEHtBAjPztNx9h4dPBBCwG8k1rcTEaAixOEALw_wcB
- US Solar Institute (2023, dezembro 12). *Pyranometer. The US Solar Institute*. <https://www.myussi.com/glossary/pyranometer>
- Van Esch, M. M. E., Looman, R. H. J., & De Bruin-Hordijk, G. J. (2012). The effects of urban and building design parameters on solar access to the urban canyon and the potential for direct passive solar heating strategies. *Energy and Buildings*, 47, 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.042>
- Van Renterghem, T., & Botteldooren, D. (2010). The importance of roof shape for road traffic noise shielding in the urban environment. *Journal of Sound and Vibration*, 329(9), 1422–1434. <https://doi.org/10.1016/J.JSV.2009.11.011>
- Van Renterghem, T; Botteldooren, D. (2012). Focused study on the quiet side effect in dwellings highly exposed to road traffic noise. *International journal of environmental research and public health*, , 9(12), 4292–4310.
- Van Renterghem, T., Hornikx, M., Forssen, J., & Botteldooren, D. (2013). The potential of building envelope greening to achieve quietness. *Building and Environment*, 61, 34–44. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2012.12.001>
- Van Renterghem, T., Salomons, E., & Botteldooren, D. (2006). Parameter study of sound propagation between city canyons with a coupled FDTD-PE model. *Applied Acoustics*, 67(6), 487–510. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2005.09.006>
- Vartholomaios, A. (2015). Climatic urban design strategies for the Mediterranean. *Proceedings of the international conference on Changing Cities II*.
- Vartholomaios, A. (2017). A parametric sensitivity analysis of the influence of urban form on domestic energy consumption for heating and cooling in a Mediterranean city. *Sustainable Cities and Society*, 28, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.006>
- Vermeulen, T., Knopf-Lenoir, C., Villon, P., & Beckers, B. (2015). Urban layout optimization framework to maximize direct solar irradiation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.01.001>

- Vignola, F., Michalsky, J., & Stoffel, T. (2019). Solar and infrared radiation measurements, second edition. *Solar and Infrared Radiation Measurements, Second Edition*, 1–494. <https://doi.org/10.1201/B22306/SOLAR-INFRARED-RADIATION-MEASUREMENTS-SECOND-EDITION-FRANK-VIGNOLA-JOSEPH-MICHALSKY-THOMAS-STOFFEL>
- Wang, X;Zhang, X;Zhu, S;Ren, J., & Causone, F;Ye, Y;Jin, X;Zhou, X;Shi, X. (2023). A novel and efficient method for calculating beam shadows on exterior surfaces of buildings in dense urban contexts. *Building and Environment*, 229, 109937. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109937>
- Wassmer, R. W. (2000). *Urban Sprawl in a U.S. Metropolitan Area: Ways to Measure and a Comparison of the Sacramento Area to Similar Metropolitan Areas in California and the U.S.* CSUS Public Policy and Administration Working Paper No. 2000-03, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=241975> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.241975>
- Wen, J., Xie, Y., Yang, S., Yu, J., & Lin, B. (2022). Study of surrounding buildings' shading effect on solar radiation through windows in different climates. *Sustainable Cities and Society*, 86, 104143. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2022.104143>
- Wen, J., Yang, S., Xie, Y., Yu, J., & Lin, B. (2022). A fast calculation tool for assessing the shading effect of surrounding buildings on window transmitted solar radiation energy. *Sustainable Cities and Society*, 81, 103834. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2022.103834>
- Wilde, S. de, & van den Dobbelsteen, A. (2004). Space use optimisation and sustainability—environmental comparison of international cases. *Journal of Environmental Management*, 73(2), 91–101. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2004.06.003>
- World Meteorological Organisation (WMO). (2023, Janeiro 3). *Climate change*. <https://wmo.int/topics/climate-change>
- World Commission on Environment and Development. (2020, maio 5). Report of the World Commission on Environment and Development : note / by the Secretary-General.. <https://digitallibrary.un.org/record/139811?v=pdf>
- Yigitcanlar, T., Kamruzzaman, M., Foth, M., Sabatini-Marques, J., da Costa, E., & Ioppolo, G. (2019). Can cities become smart without being sustainable? A systematic review of the literature. Em *Sustainable Cities and Society* (Vol. 45, pp. 348–365). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.033>
- Zanescio, I. (1991). *Análise e construção de um piranômetro fotovoltaico* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. Repositório da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. <http://hdl.handle.net/10183/189638>
- Zhao, W.-J., Liu, E.-X., Poh, H. J., Wang, B., Gao, S.-P., Png, C. E., Li, K. W., & Chong, S. H. (2017). 3D traffic noise mapping using unstructured surface mesh representation of buildings and roads. *Applied Acoustics*, 127, 297–304. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.06.025>

ANEXO I

No Anexo I é apresentado um exemplo de uma ficha técnica desenvolvida para a medição de ruído no local de medição e neste caso preenchida, a título de exemplo com os dados do PC1.

Ponto de controlo: PC1.....Data da Leitura: 17-02-2023

Medição: Hora.....Início: 15h30.....Fim: 15h 46min 08s

LAIT – LAT = 4.8 d(BA)

LAIT = 59.0 d(BA)

LAT = Leq = 54.20 d(BA)

L5 = 60.1

L95= 42.9

Observações: Em todos os PC houve muito vento, durante toda a medição (previsão era de 44km/h)

Medição	Hora	Início: 15h30				Fim: 15h 46min 08s			
Classes de Veículos	Informação recolhida	Vias							
	Categoria	Via1.1	Via1.2	Via1.3	Via 1.4	Via 2.1	Via 2.2	Via 3.1	Via 3.2
Veículos a motor ligeiros	1	28	26	26	19	7	5	0	0
Veículos pesados médios	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Veículos pesados	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Veículos a motor de duas rodas	4a	0	0	0	0	0	0	0	0
Veículos a motor de duas rodas	4b	0	0	0	0	0	0	0	0

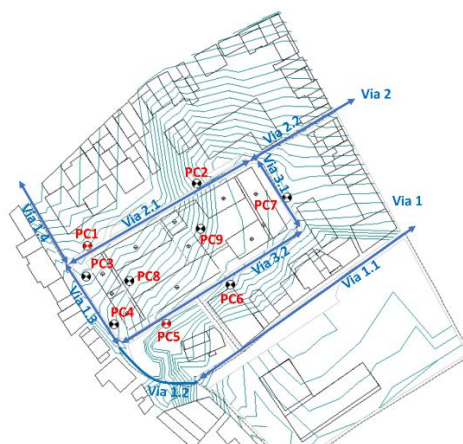
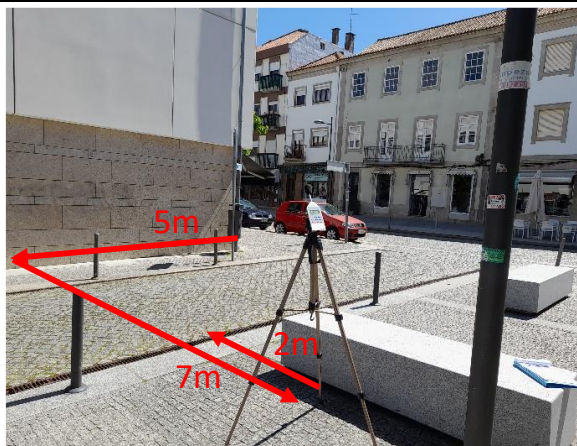


Foto do PC1 com as respetivas distâncias de referência

Imagem da localização de todos os PC e vias

ANEXO II

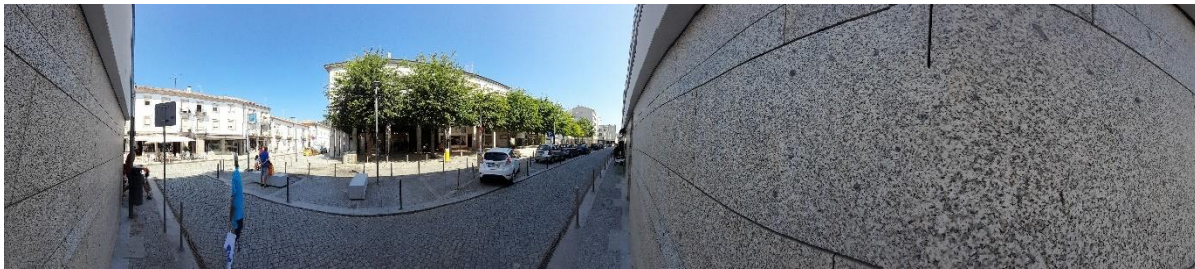
No Anexo II é apresentado um exemplo de uma ficha técnica desenvolvida para a medição de radiação no local de medição e neste caso preenchida, a título de exemplo com os dados do PC1.

Folha Medição _in situ_

Ponto de controlo: PC 1		Data da Leitura: 17 de Fevereiro de 2023	
Operador:		Supervisão:	
Equipamento: (Piranómetro de silício + Piranómetro termopilha + Medidor solar)			
Período de contagem: Início: 9h30		Fim: 9h40	
Sensores	Unidades	Informação recolhida pontualmente	Informação recolhida _média aritmética
		9h40	9h30-9h40
Piranómetro de silício	(W/m ²)	37,30	30.50
Piranómetro de termopilha	(W/m ²)	31,75	27,00
Medidor Solar	(W/m ²)	42,00	-



Fotografia panorâmica da envolvente do ponto de medição



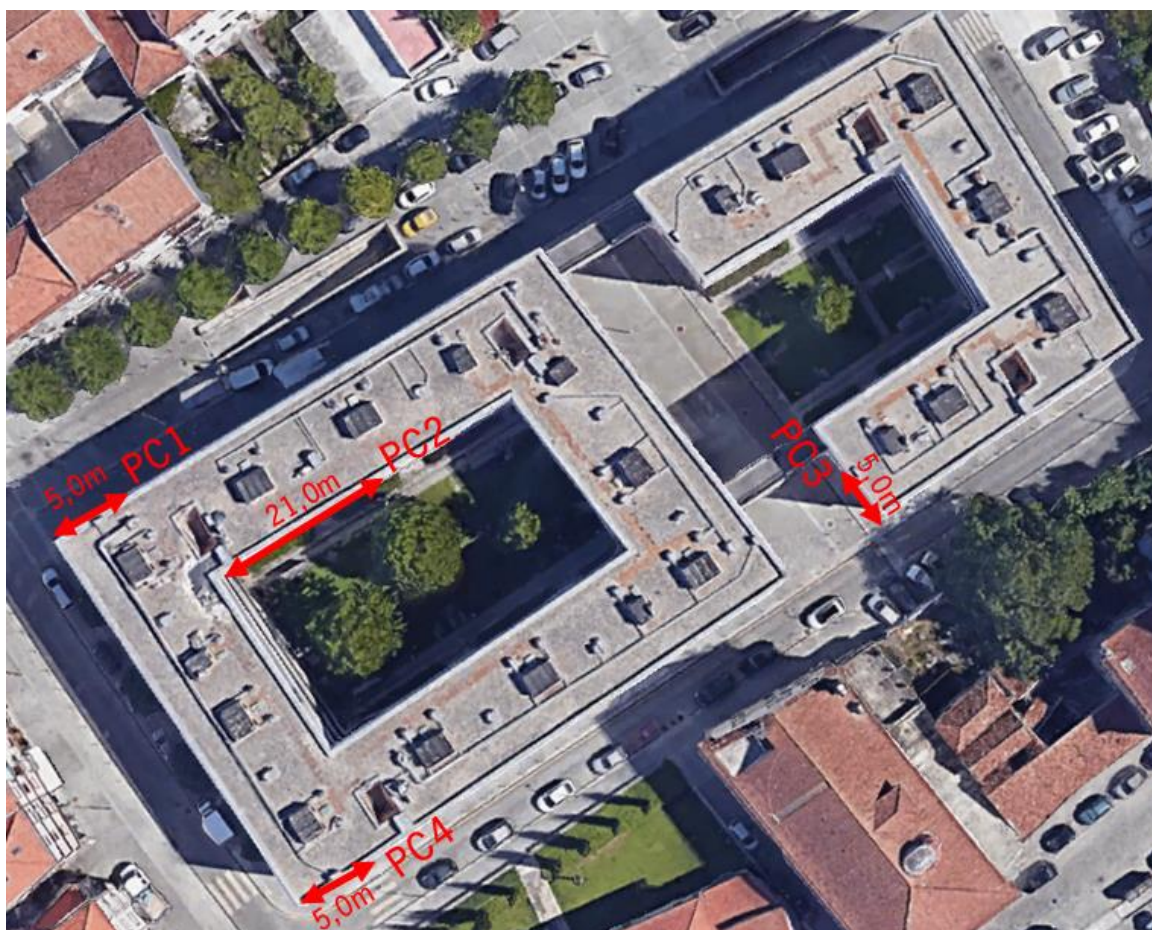
Fotografia panorâmica da envolvente a partir do campo de visão do ponto de medição e hora solar 9h36.

Observações/Condições atmosféricas: Céu limpo,

Previsões atmosféricas do IPMA para o dia 17-02-2023 eram de céu limpo e vento NW todo o dia e uma velocidade de vento estimada entre 8-13Km/h.



Registo fotográfico da localização do equipamento de medição



Localização do Equipamento de Medição e Distâncias de referência

ANEXO III

No Anexo III vêm uma lista de artigos científicos efetuados no âmbito do trabalho de tese, mas também do âmbito do estudo preliminar (continuação do trabalho desenvolvido no âmbito do Mestrado em Engenharia Urbana),

Oliveira, M. (2010), A Influência da Forma Urbana na Propagação do Ruído Urbano. Pluris2010, 4º congresso Luso-Brasileiro para o Planeamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável, Faro Portugal, Outubro 2010. <https://hdl.handle.net/1822/17683>

Oliveira M.; Silva, L.T. (2010) How urban noise can be influenced by the urban form. WSEAS International Conference on Development, Energy, Environment, Economics (DEEE '10). Puerto De La Cruz, Tenerife, November-December. <https://hdl.handle.net/1822/17703> Silva, L. T; Oliveira, M. Silva, J.F. (2014), Urban form indicators as proxy on the noise exposure of buildings in Applied Acoustics 76, pp. 366-376. <https://hdl.handle.net/1822/29035>

Scopus citations:5

Oliveira M.F.; Silva, L.T. (2011) The influence of urban form in urban noise propagation, INTERNATIONAL JOURNAL of ENERGY and ENVIRONMENT, Issue 3, Volume 5, 2011, pp.356-363.

Oliveira M.F.; Silva, L.T. (2011) Urban form as environmental noise indicators, Internoise 2012, 2012, <https://hdl.handle.net/1822/22918>

Scopus citations:0

Oliveira M.F.; Silva, L.T. (2011) The influence of urban form on facades noise levels. WSEAS Transactions on Environment and Development, 7 (5), pp.125-135. <https://hdl.handle.net/1822/17686>

Scopus citations:15

Silva, L. T; Oliveira, M. Silva, J.F. (2014), Urban form indicators as proxy on the noise exposure of buildings in Applied Acoustics 76, pp. 366-376. <https://hdl.handle.net/1822/29035>

Scopus citations:56

Oliveira, M.F.; Mendonça, P.; Tenpierik, M.; Santiago, P.; Silva, J.F.; Silva, L.T. Shading Calculation Methods and Regulation Simplifications—The Portuguese Case. Buildings 2023, 13, 1521. <https://doi.org/10.3390/buildings13061521>

<https://www.mdpi.com/2075-5309/13/6/1521>

(SCIMAGO - Q1)

Scopus citations:1

Oliveira, M.; Silva Lopes, H.; Mendonça, P.; Tenpierik, M.; Silva, L.T. Solar Radiation Measurement Tools and Their Impact on In Situ Testing—A Portuguese Case Study. *Buildings* 2024, 14, 2117.

<https://doi.org/10.3390/buildings14072117>

<https://www.mdpi.com/2075-5309/14/7/2117>

(SCIMAGO - Q1)

Scopus citations:0

ANEXO IV

No Anexo IV são apresentadas as figuras, as tabelas e os gráficos de todas as variações (A,B,C,D e E) que foram incluídos na análise de sensibilidade, em particular, no estudo variação por fachada e por piso.

Varição A

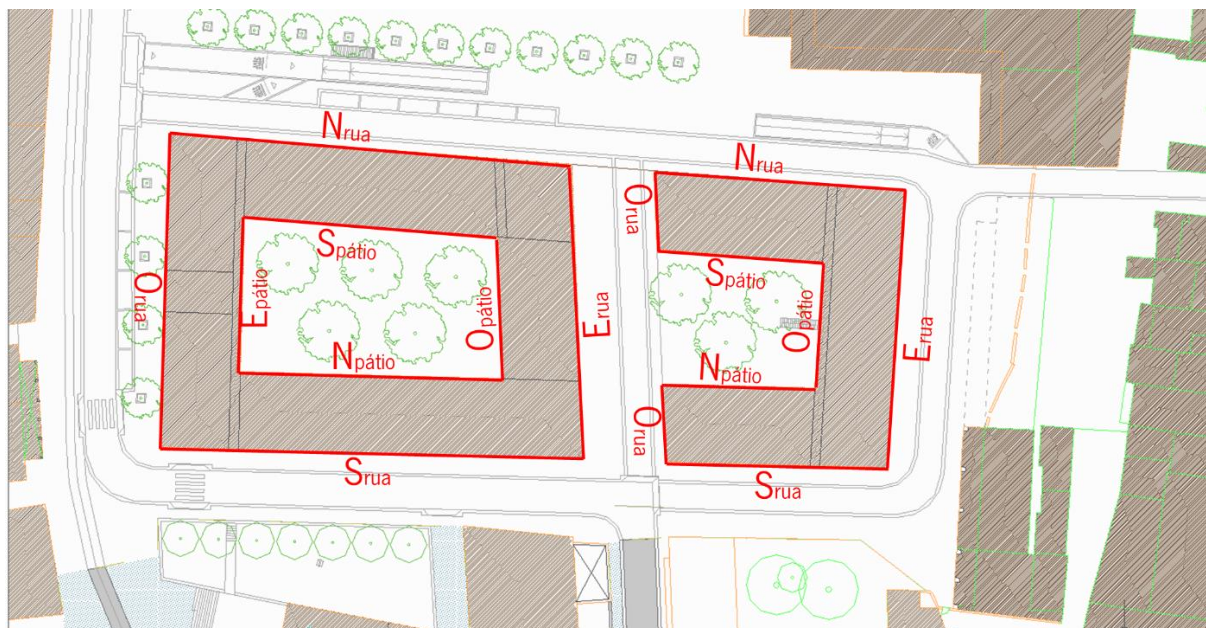


Figura 78: Ilustração da variação A

Tabela 63: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)

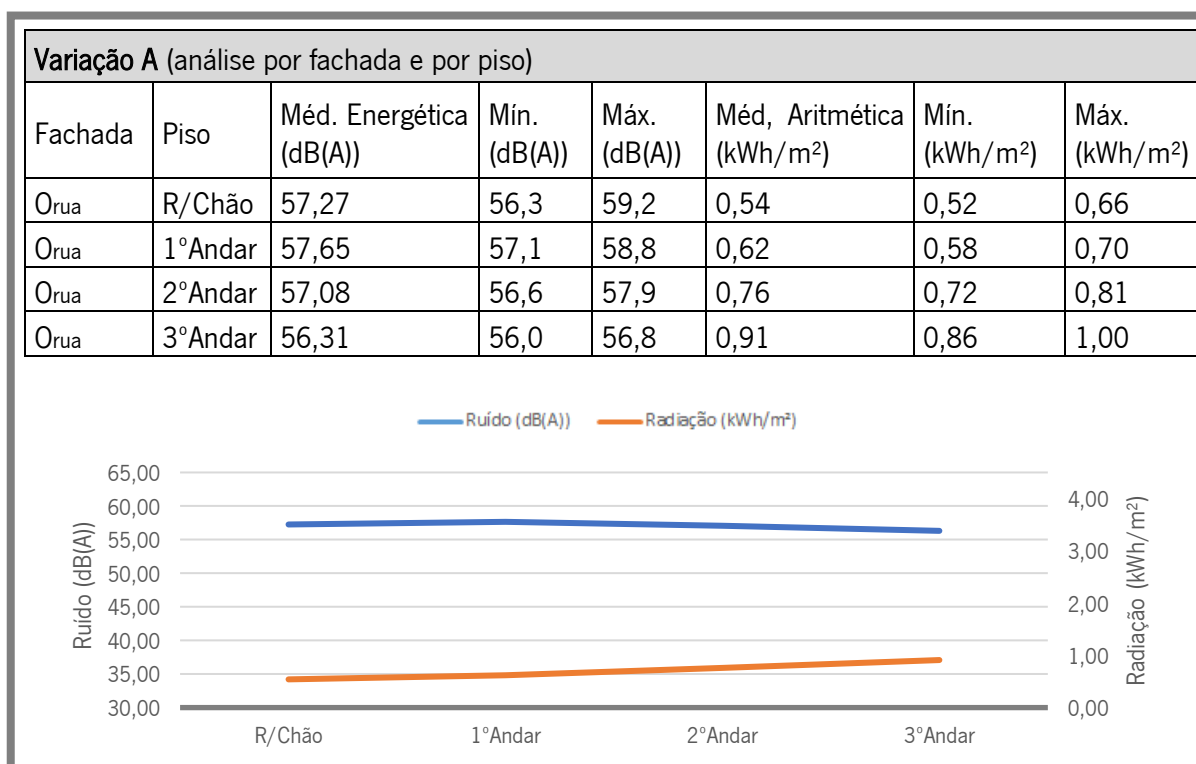


Tabela 64: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Epátio)

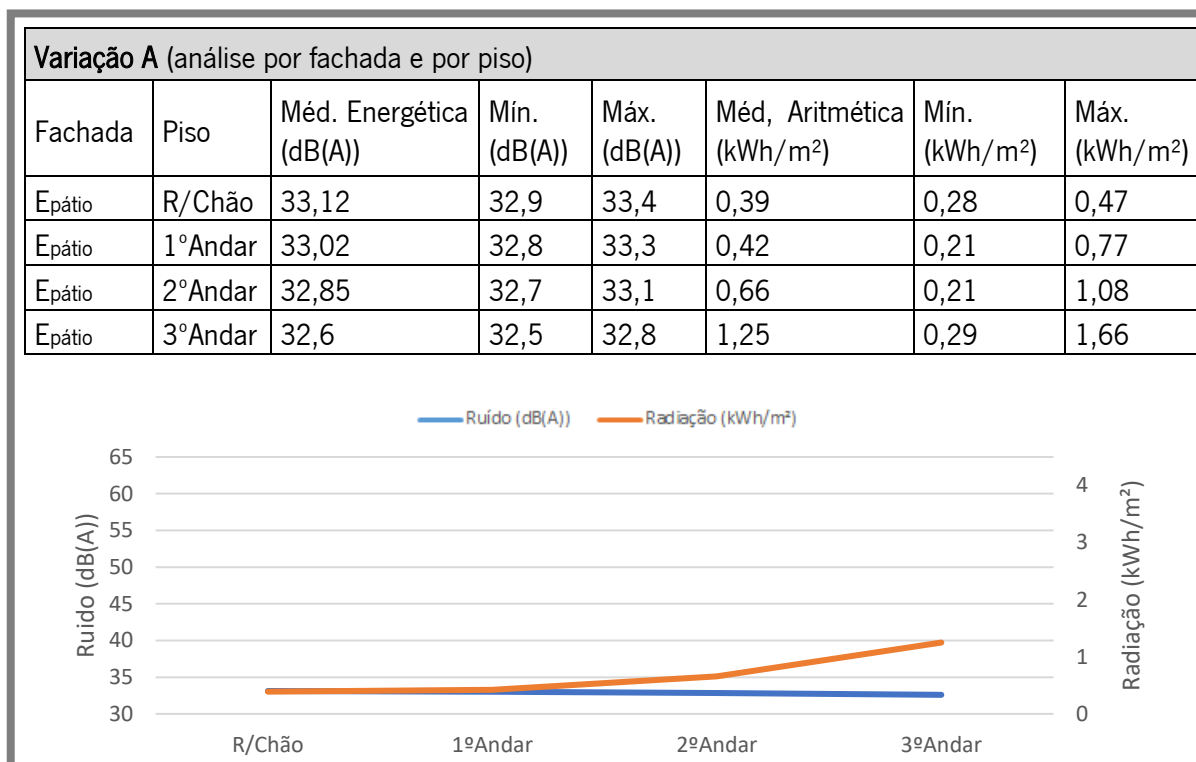


Tabela 65: Variação A (análise por fachada e por piso)(fachada Nrua)

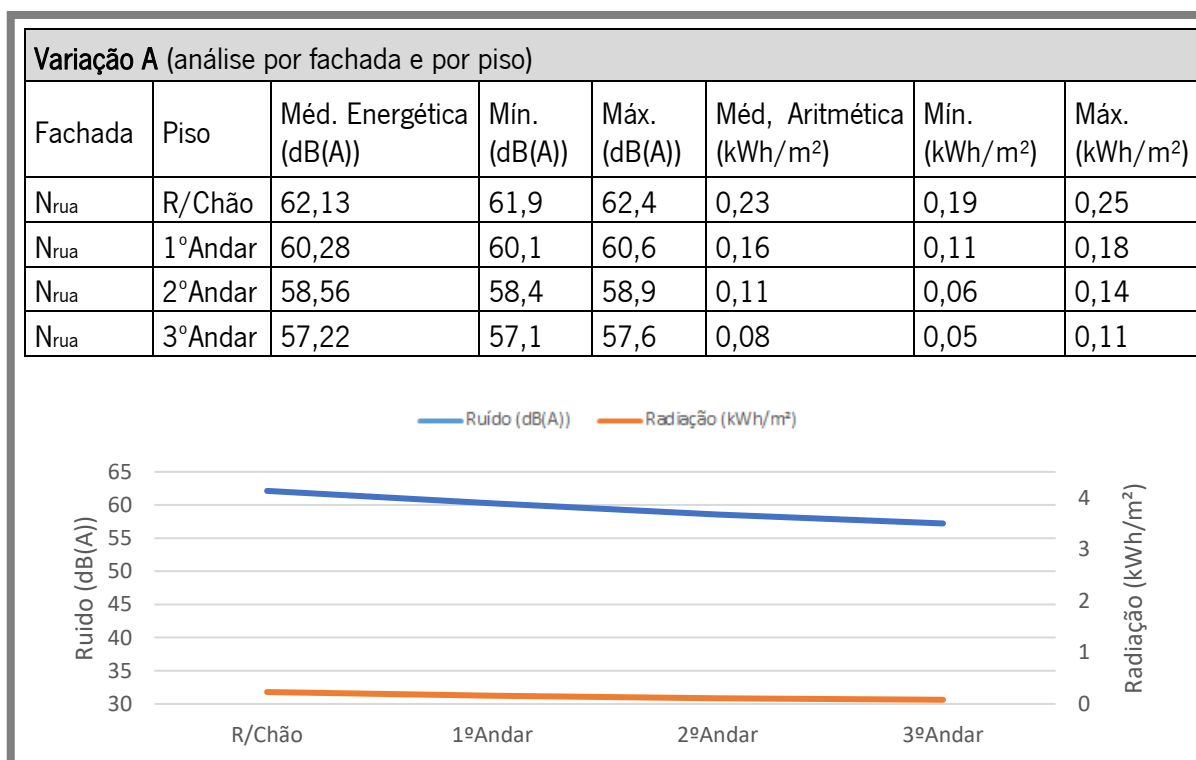


Tabela 66: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio)

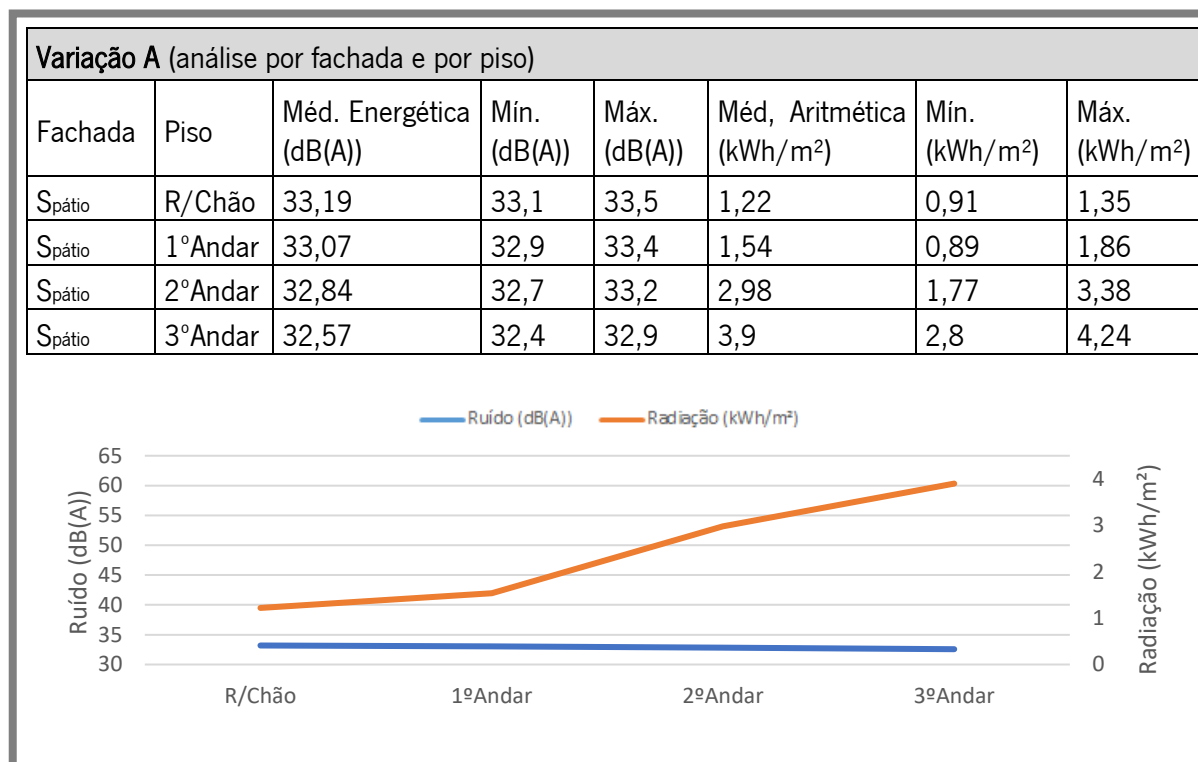


Tabela 67: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Rua)

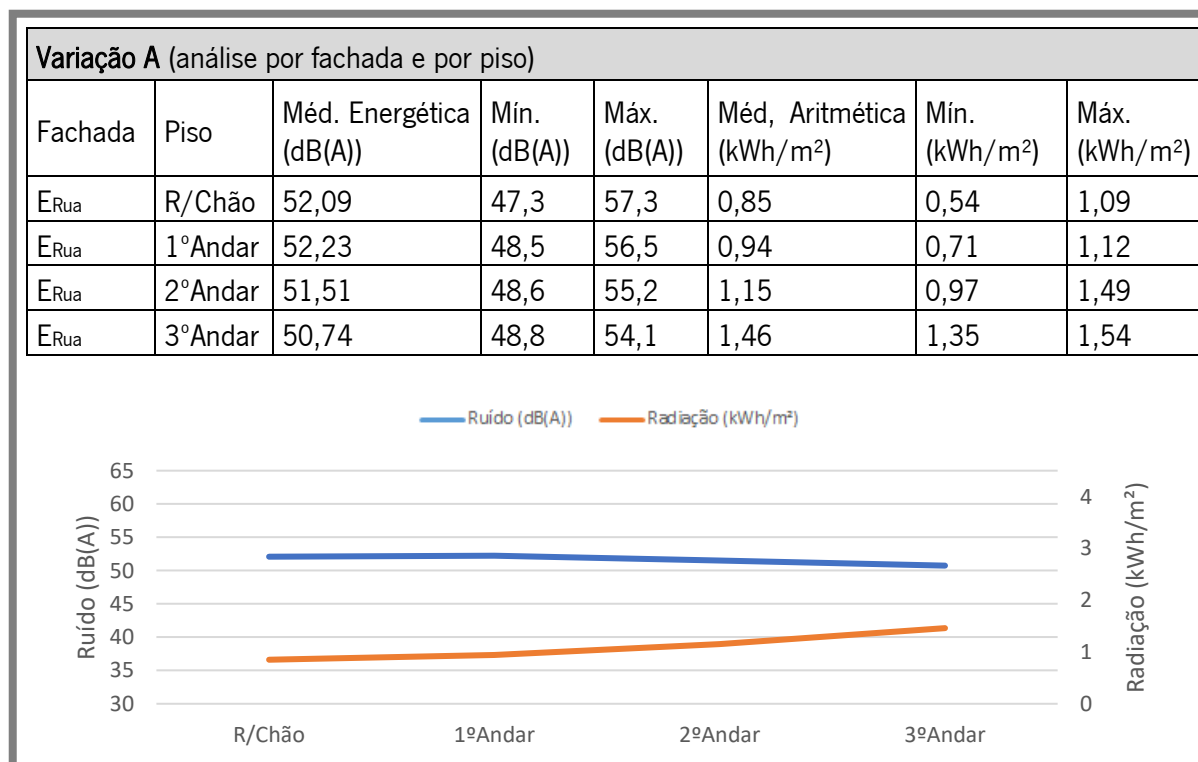


Tabela 68: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Opátio)

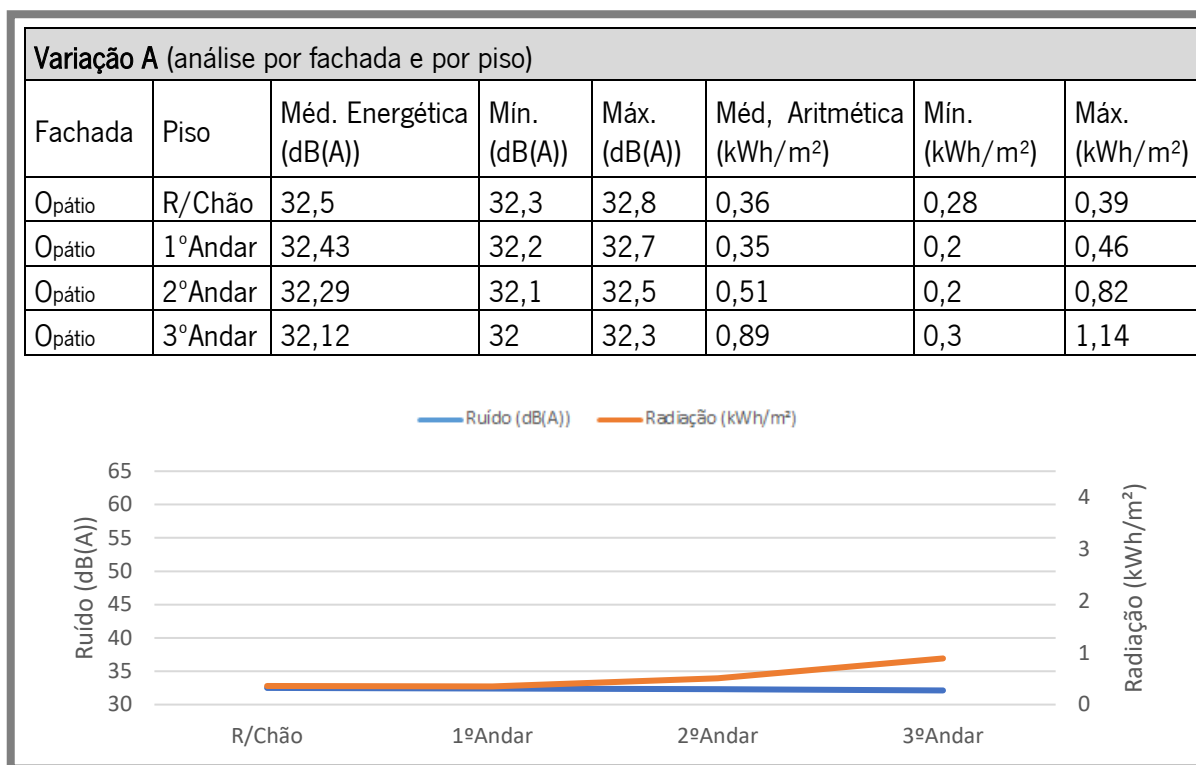


Tabela 69: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Srúa)

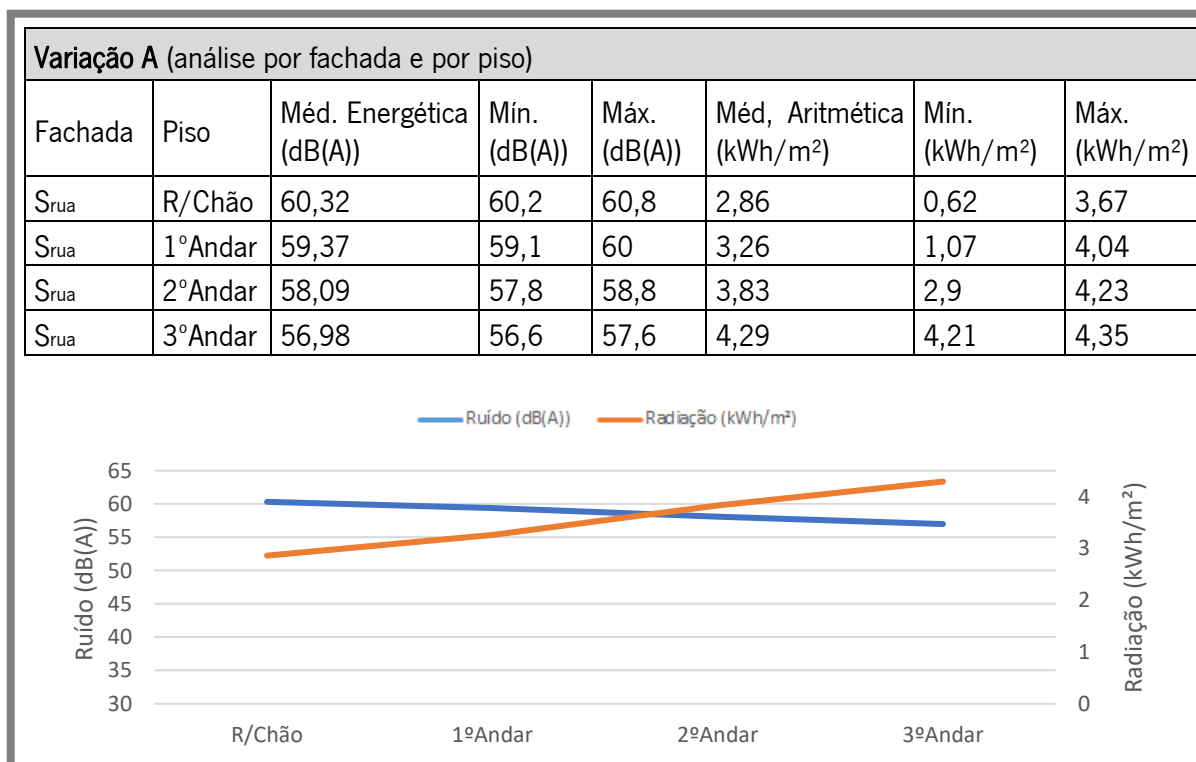


Tabela 70: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Npátio)

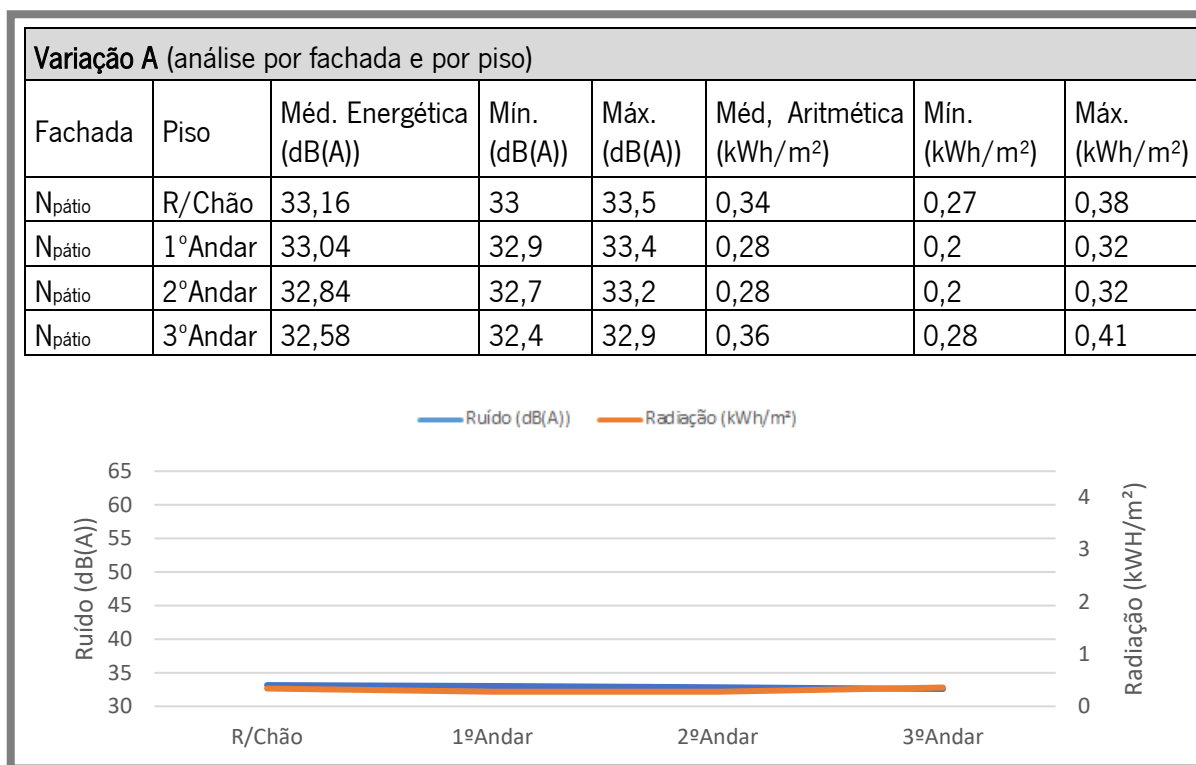


Tabela 71: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)

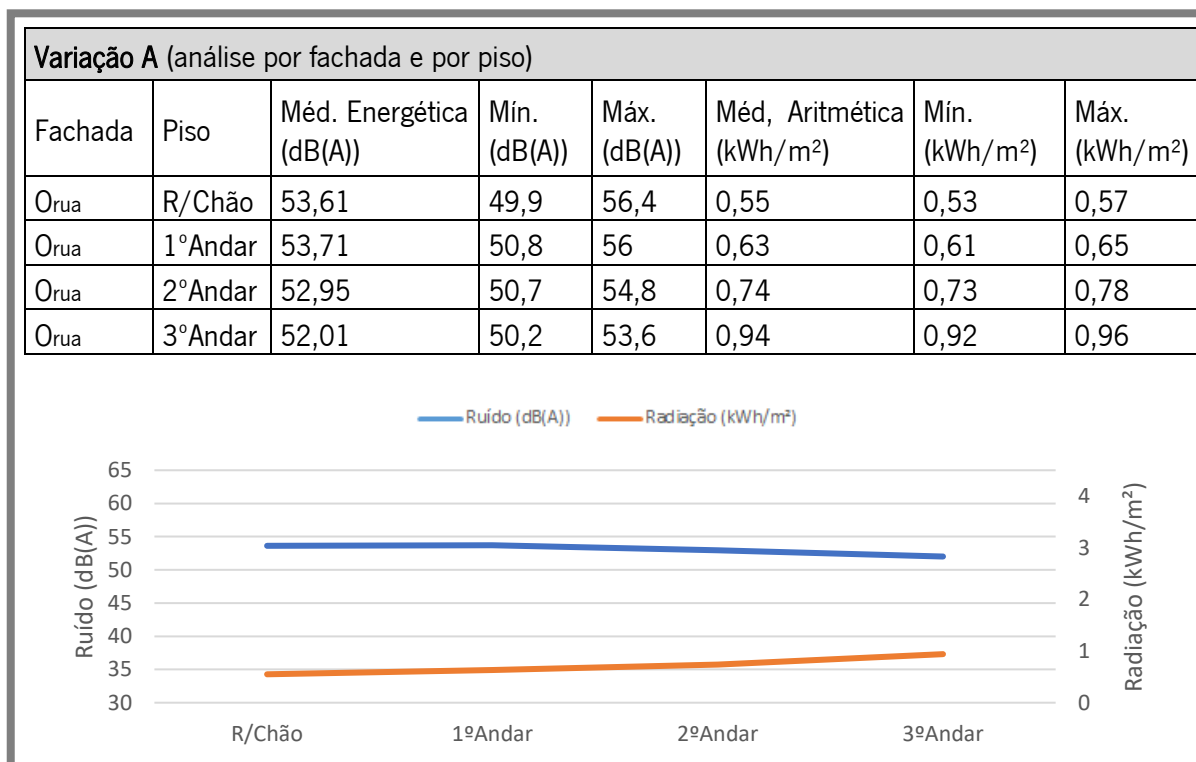


Tabela 72: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Nrua)

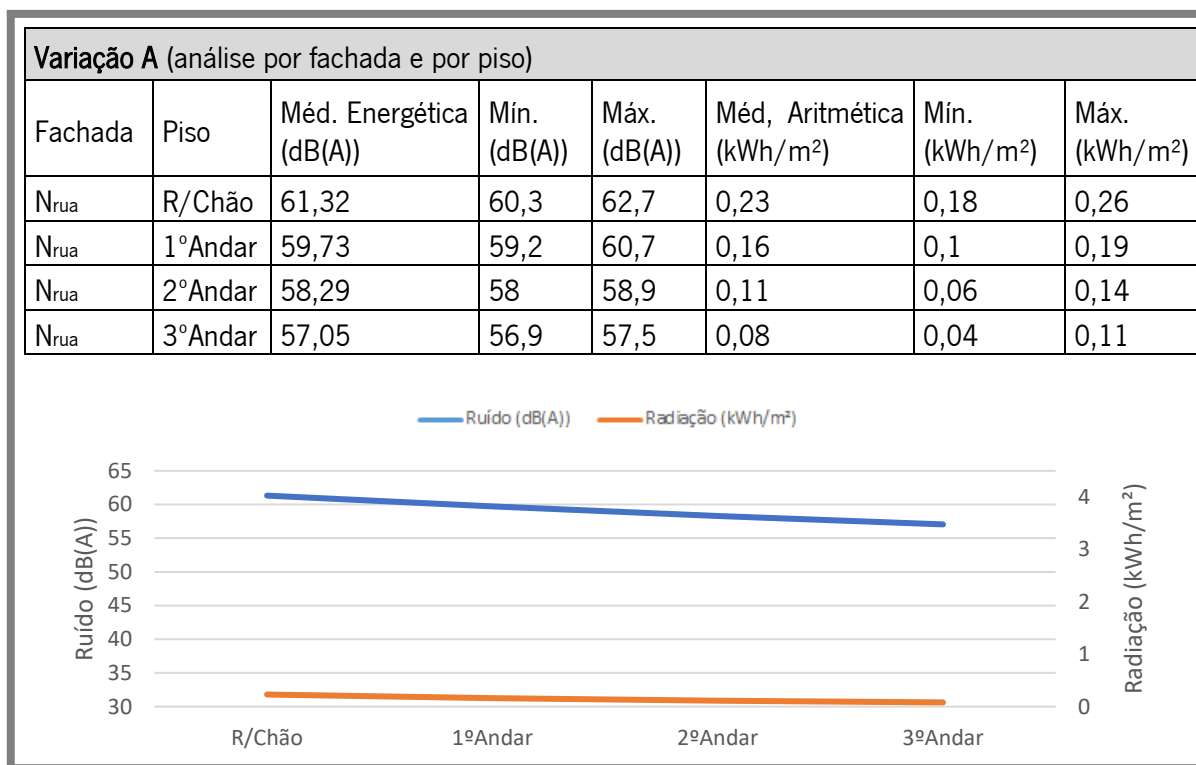


Tabela 73: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio)

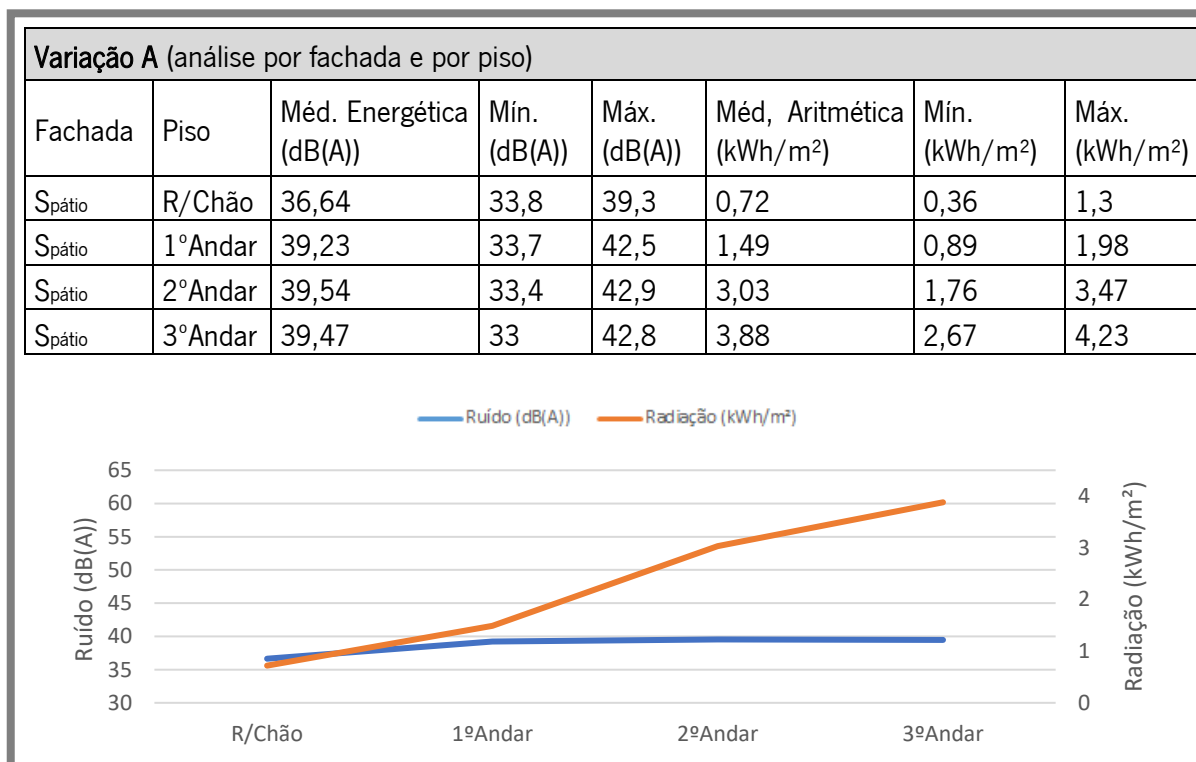


Tabela 74: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)

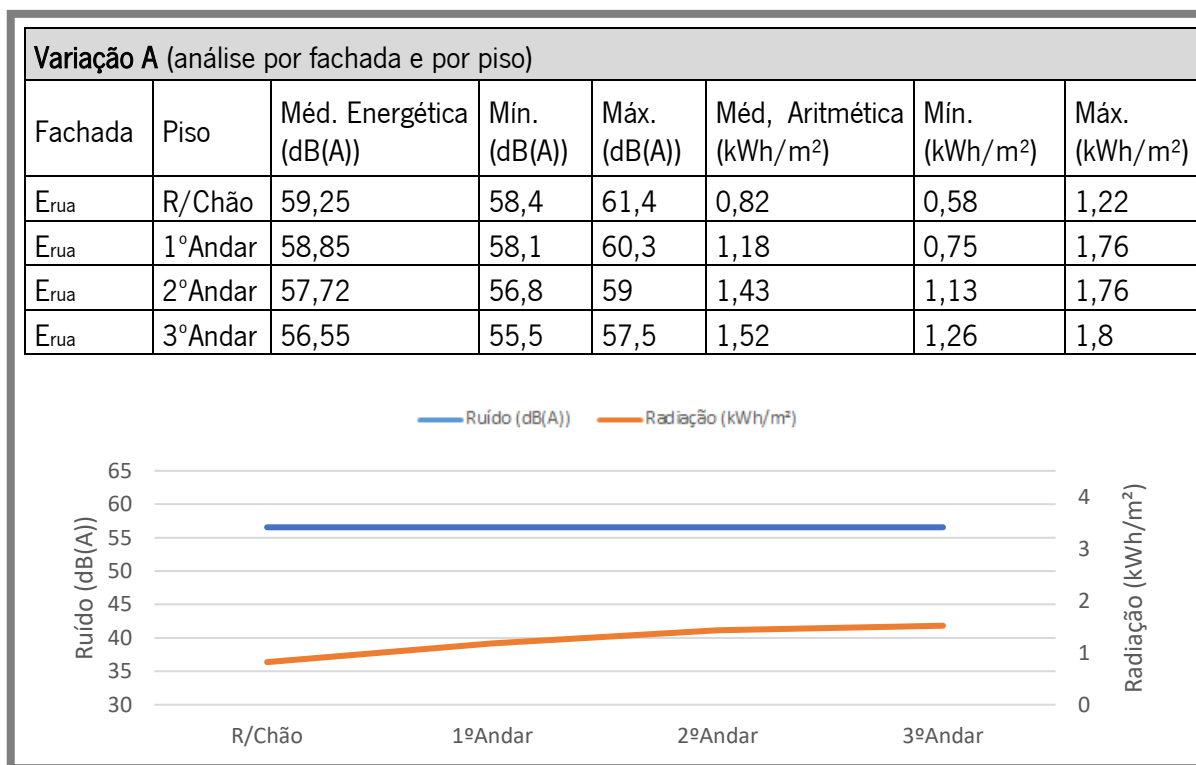


Tabela 75: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Opátio)

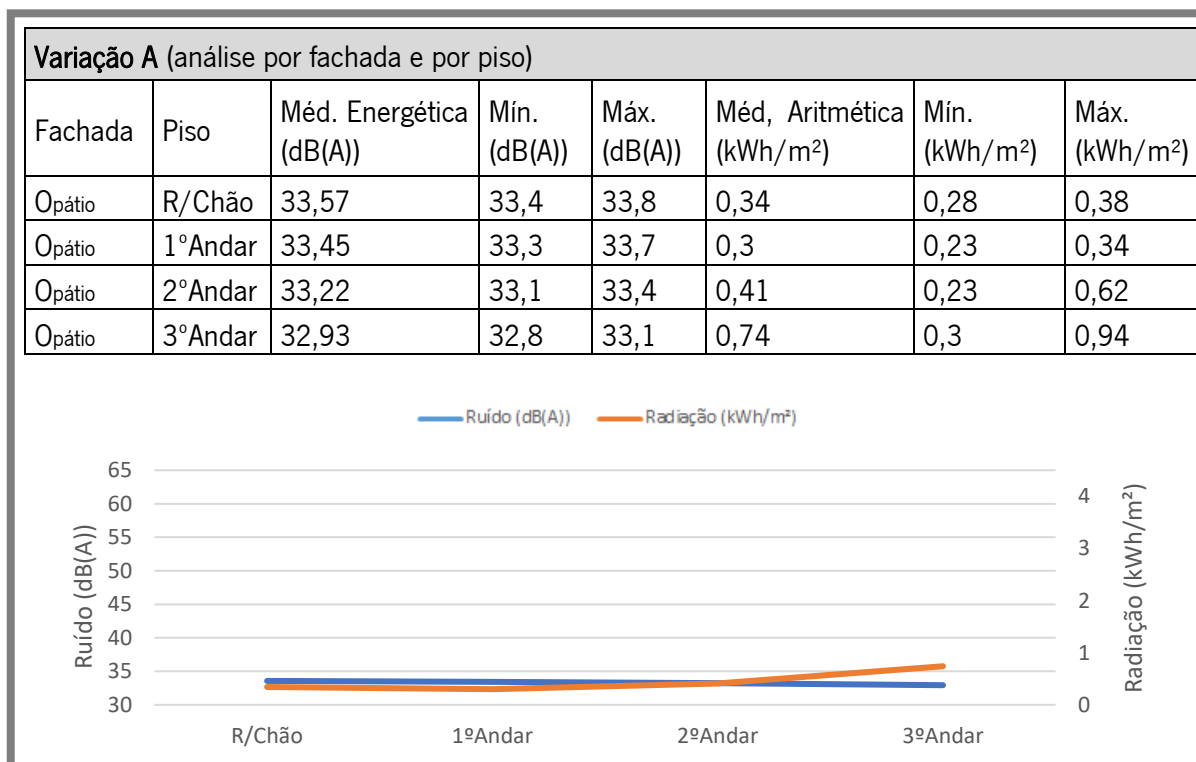


Tabela 76: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Srua)

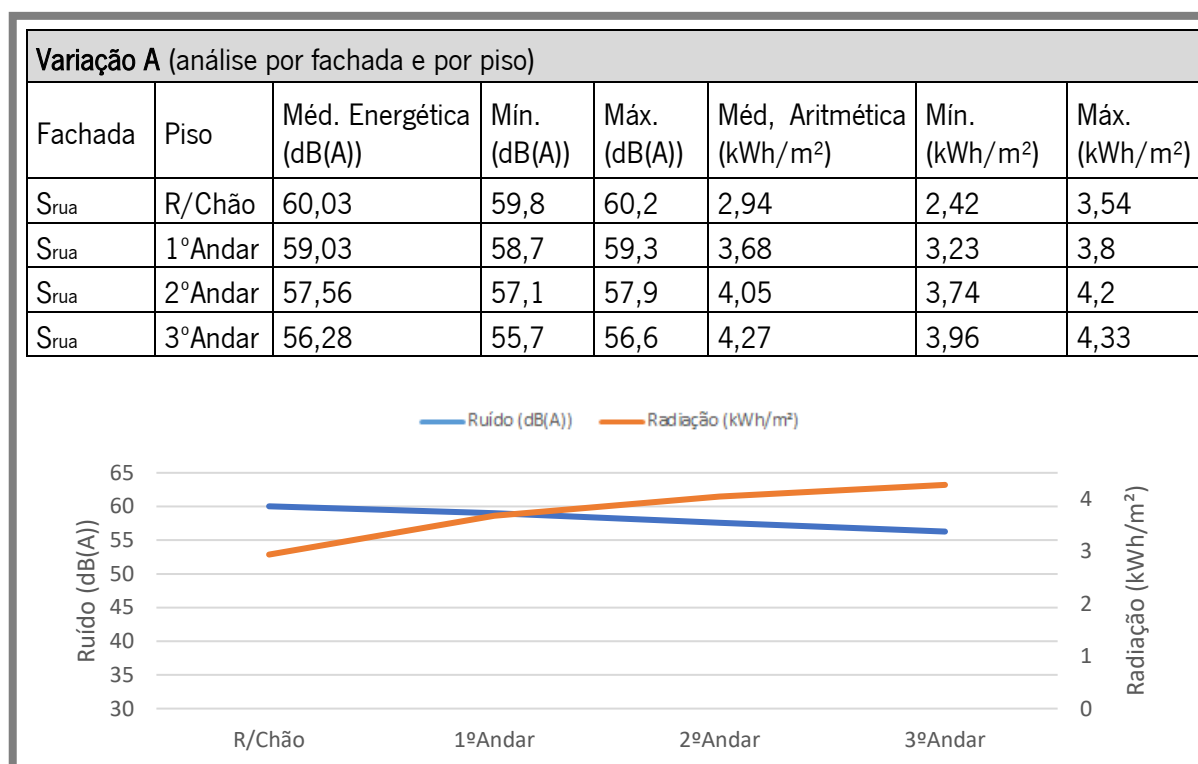


Tabela 77: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada Npátio)

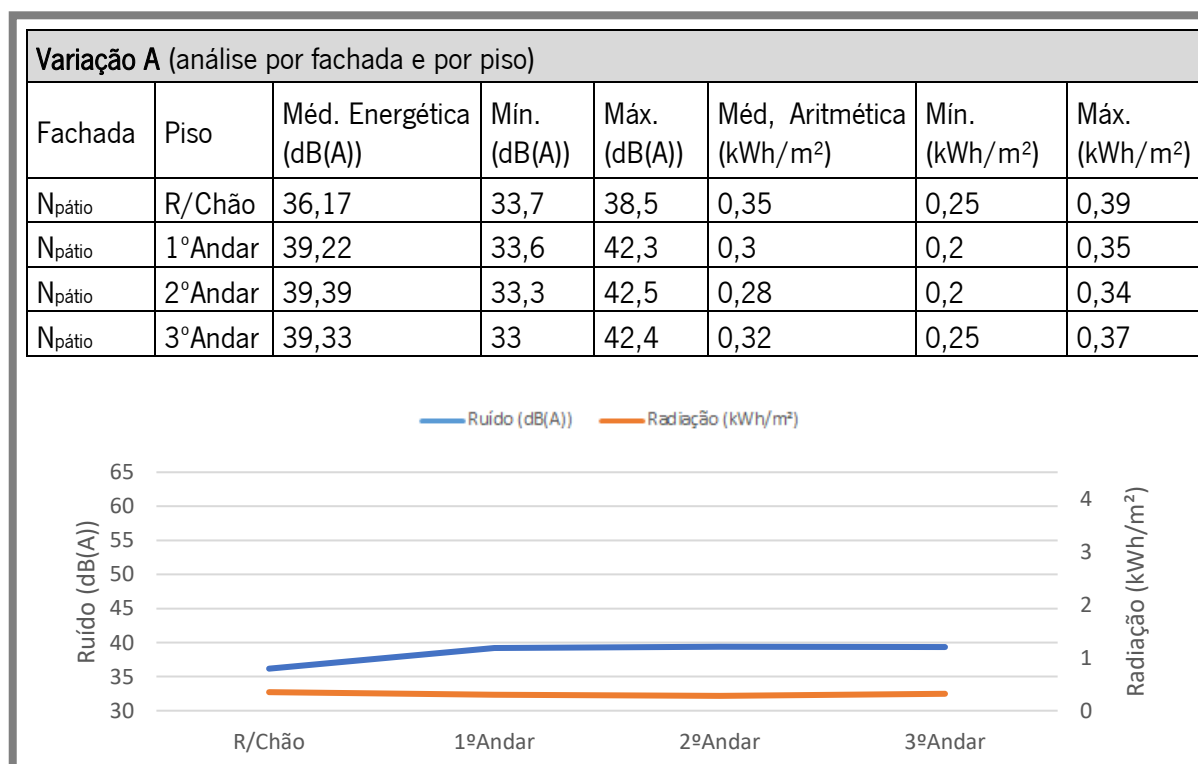
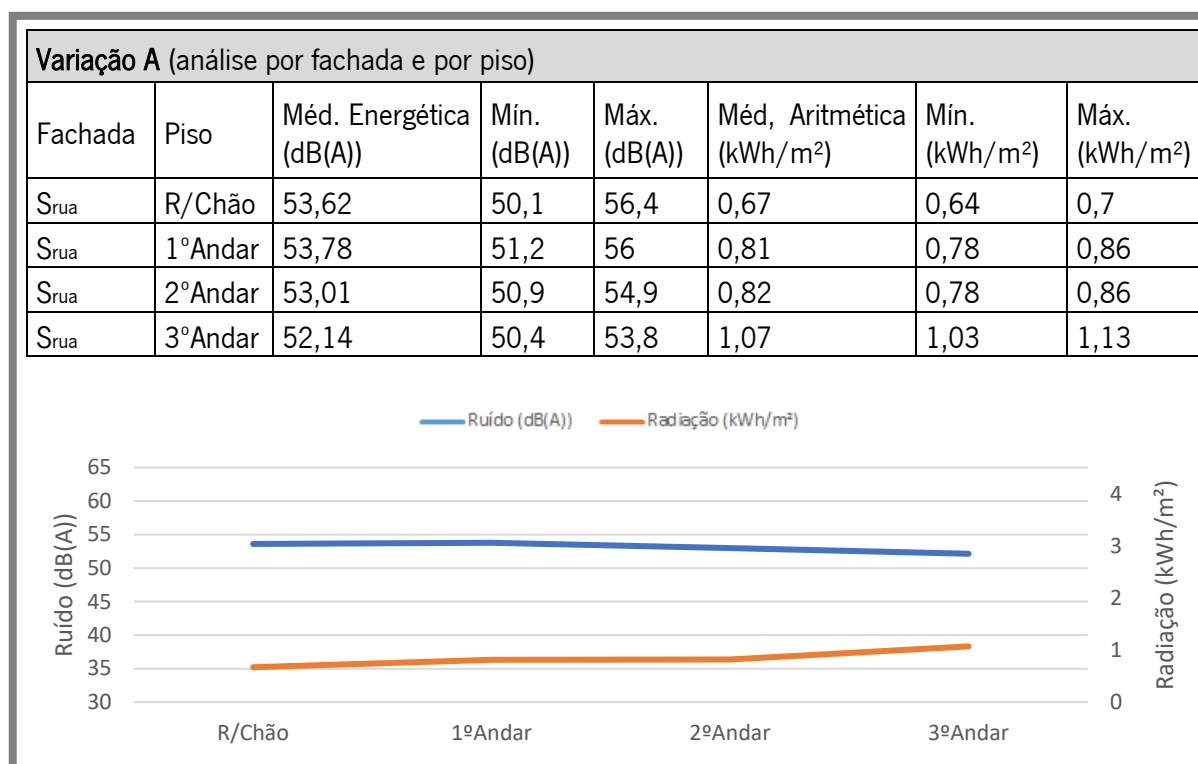


Tabela 78: Variação A (análise por fachada e por piso) (fachada S_{rua})



Variação B

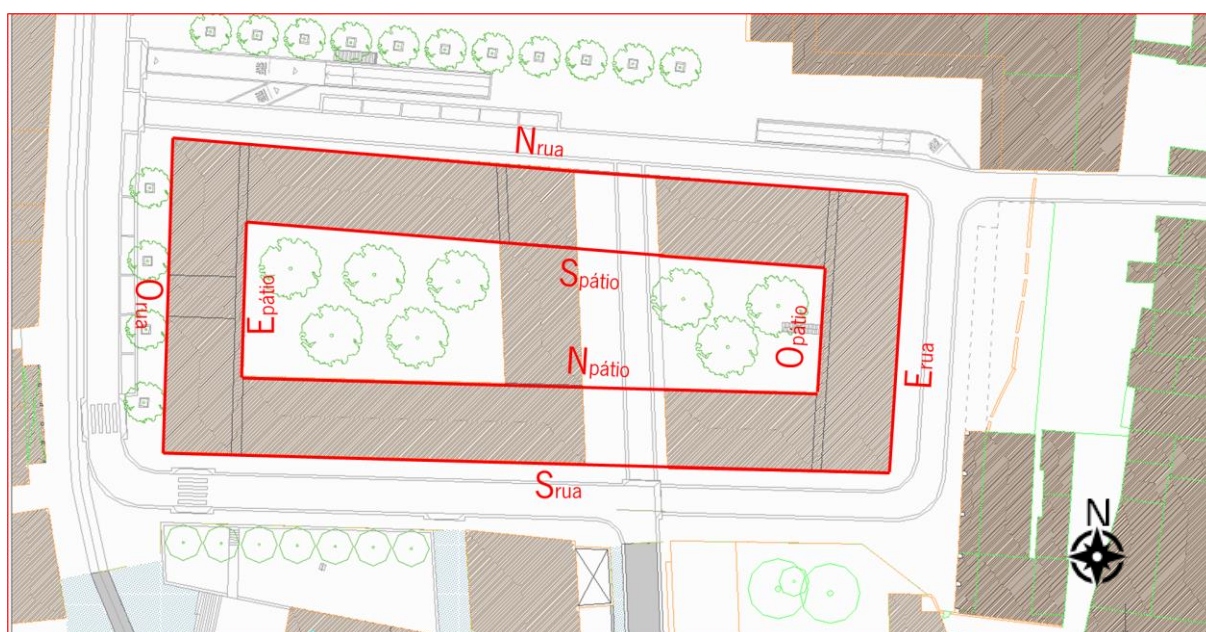


Figura 79: Ilustração da variação B

Tabela 79: Variação B (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)

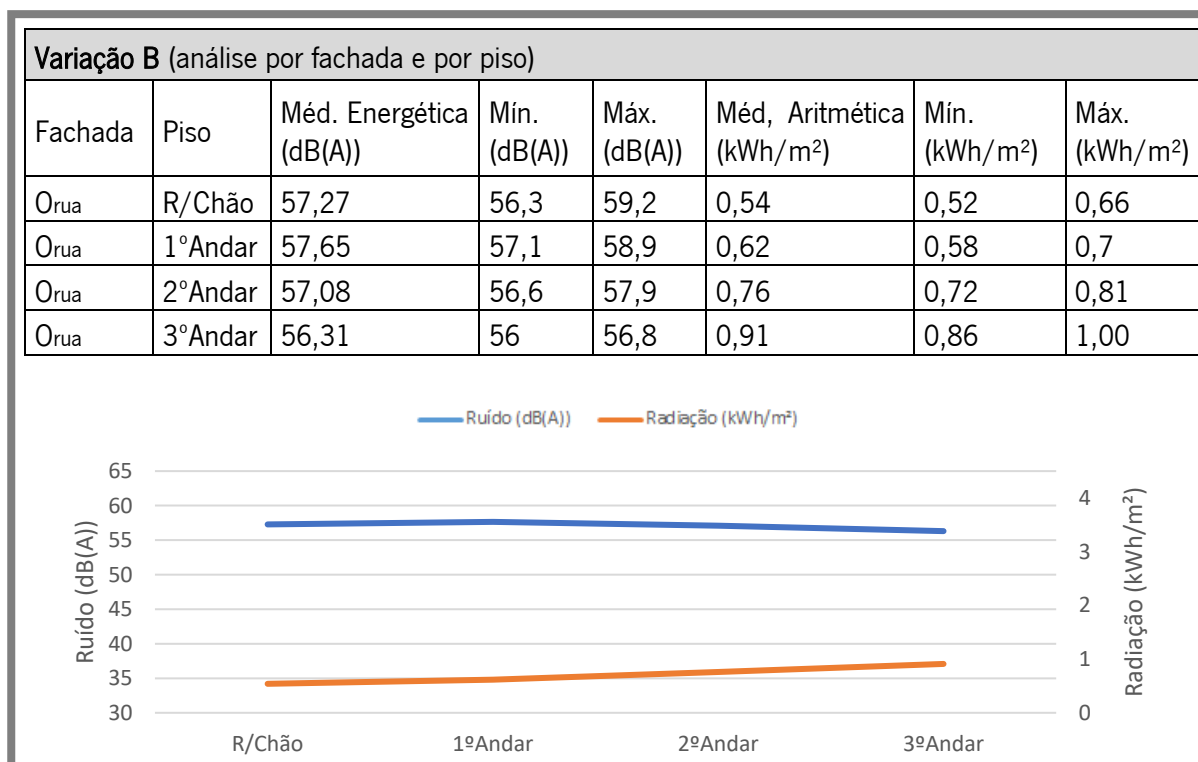


Tabela 80: Variação B (análise por fachada e por piso) (fachada Epátio)

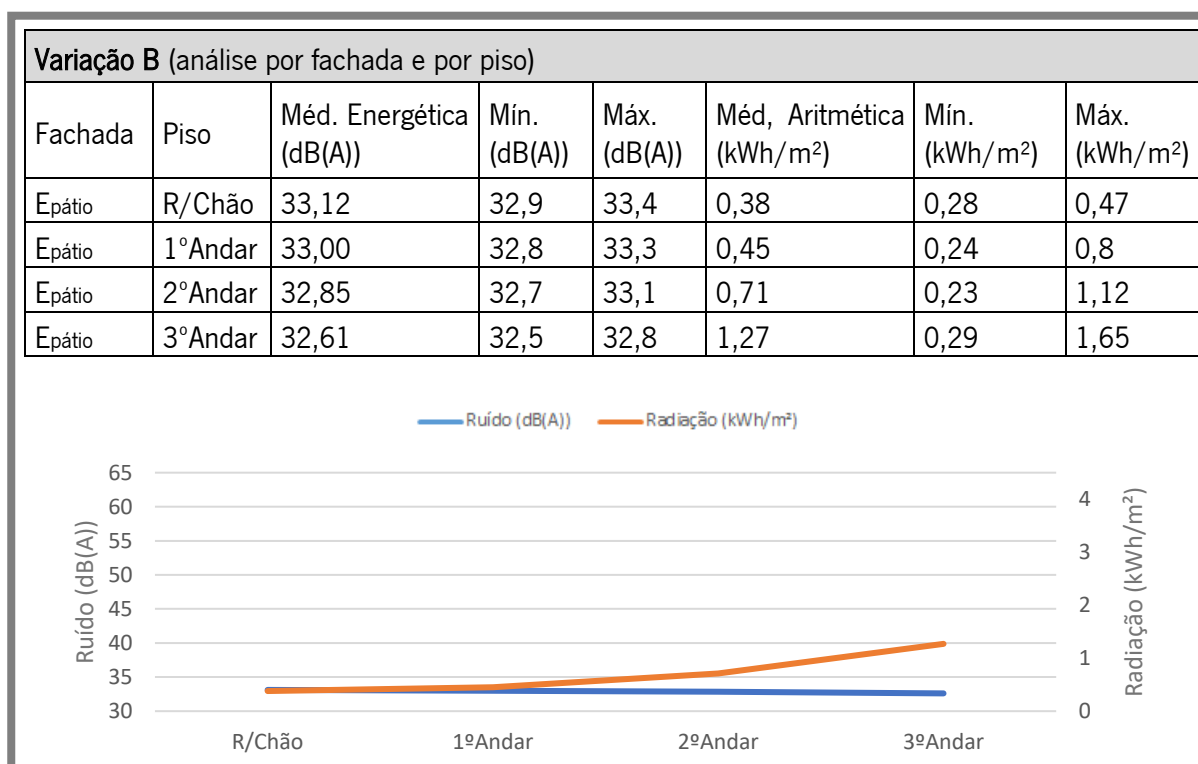


Tabela 81: Variação B (análise por fachada e por piso) (fachada Nrua)

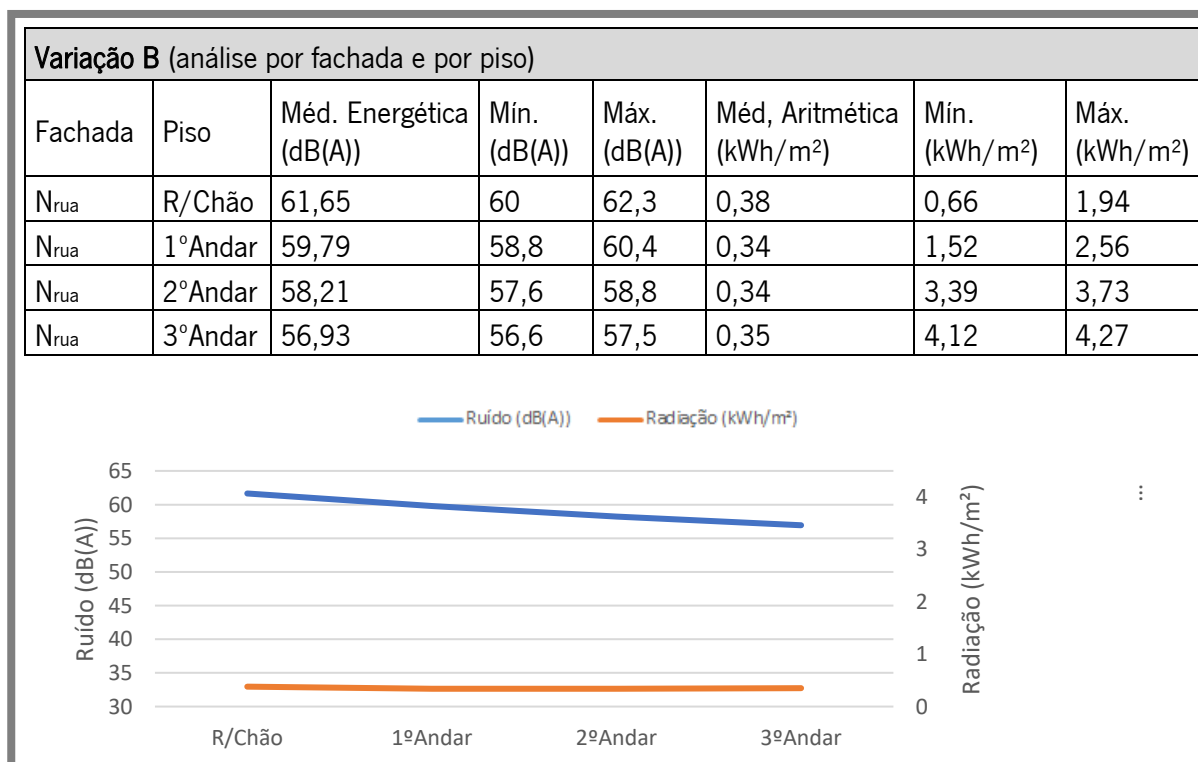


Tabela 82: Variação B (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio)

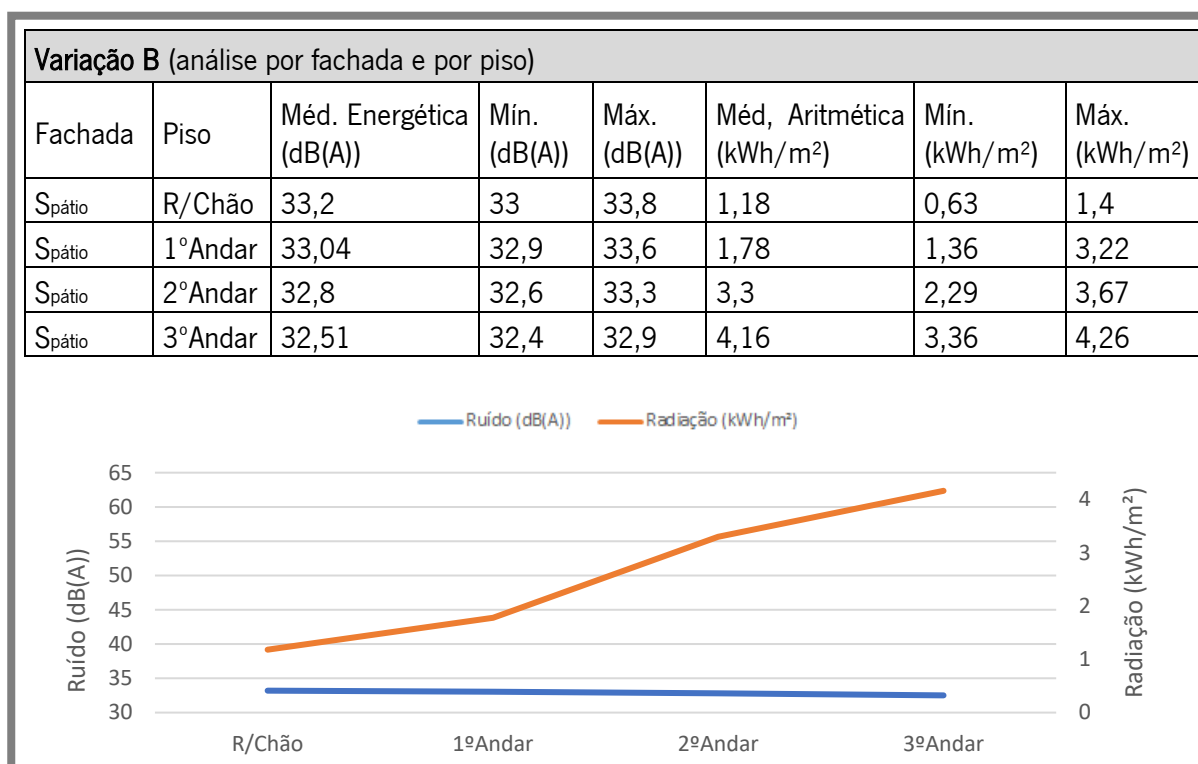


Tabela 83: Variação B (análise por fachada e por piso) (fachada Srua)

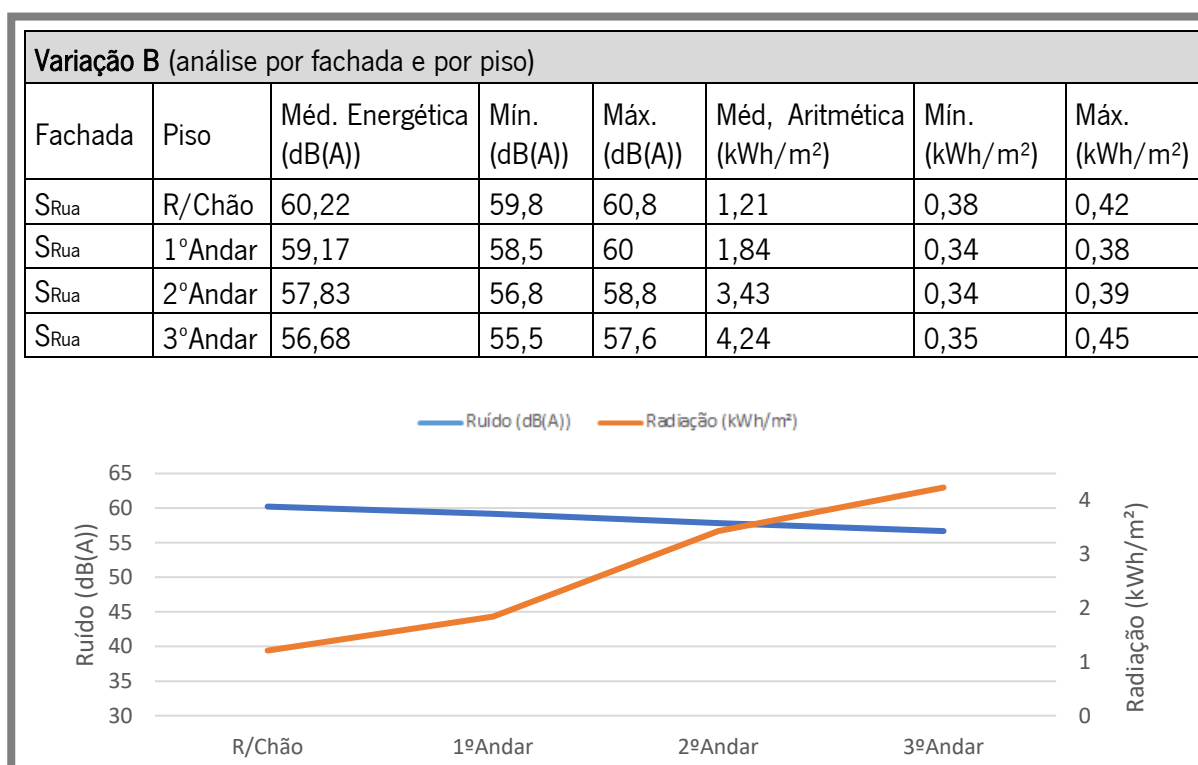


Tabela 84: Variação B (análise por fachada e por piso) (fachada Npátio)

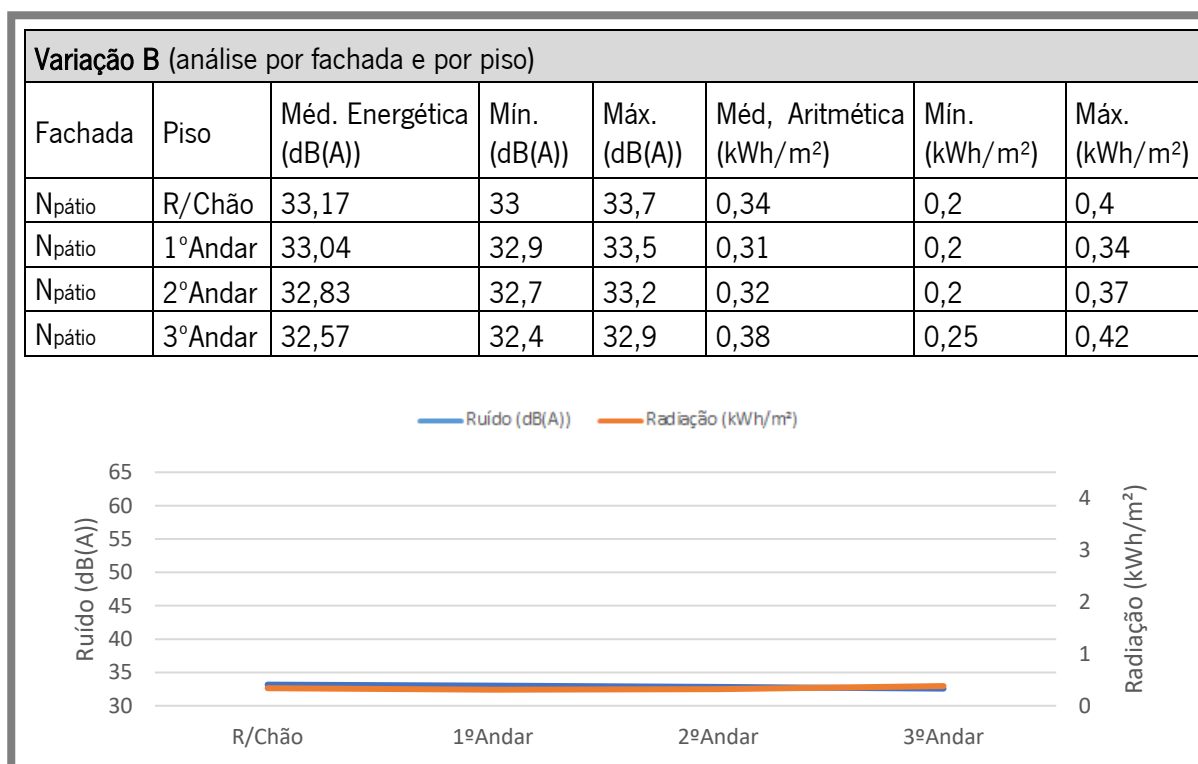


Tabela 85: Variação B (análise por fachada e por piso) (fachada Rua)

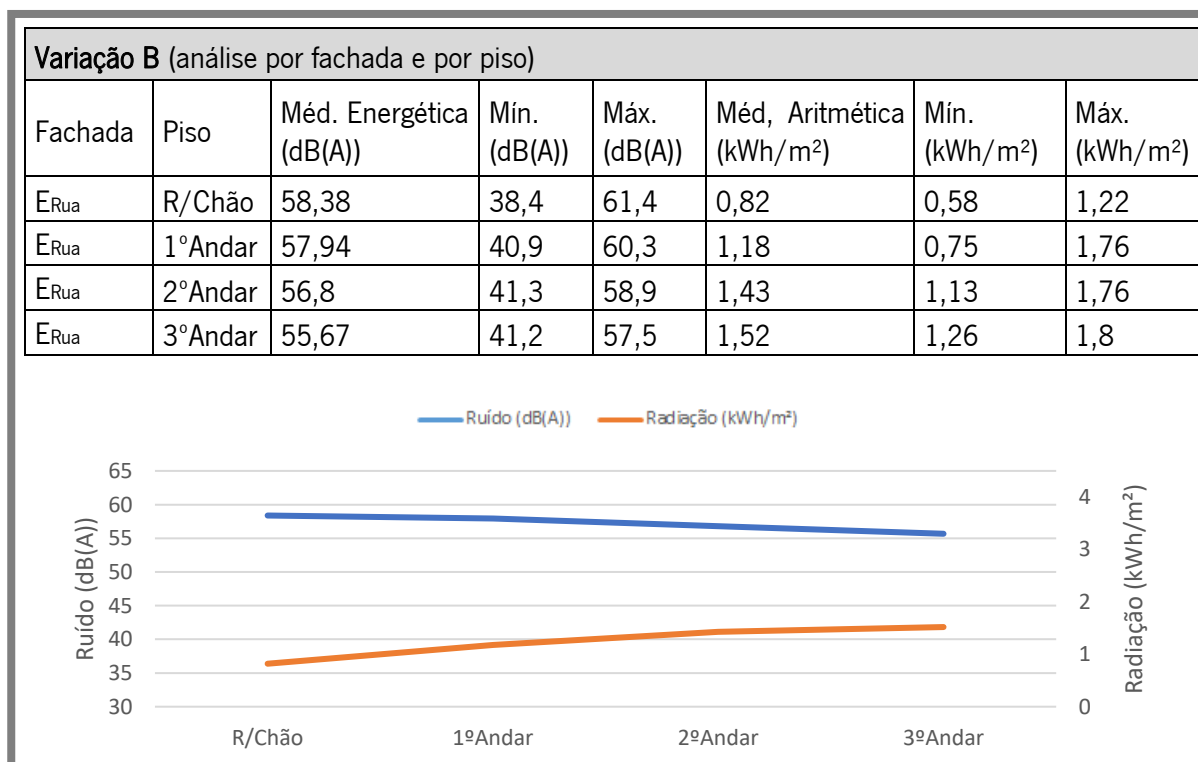
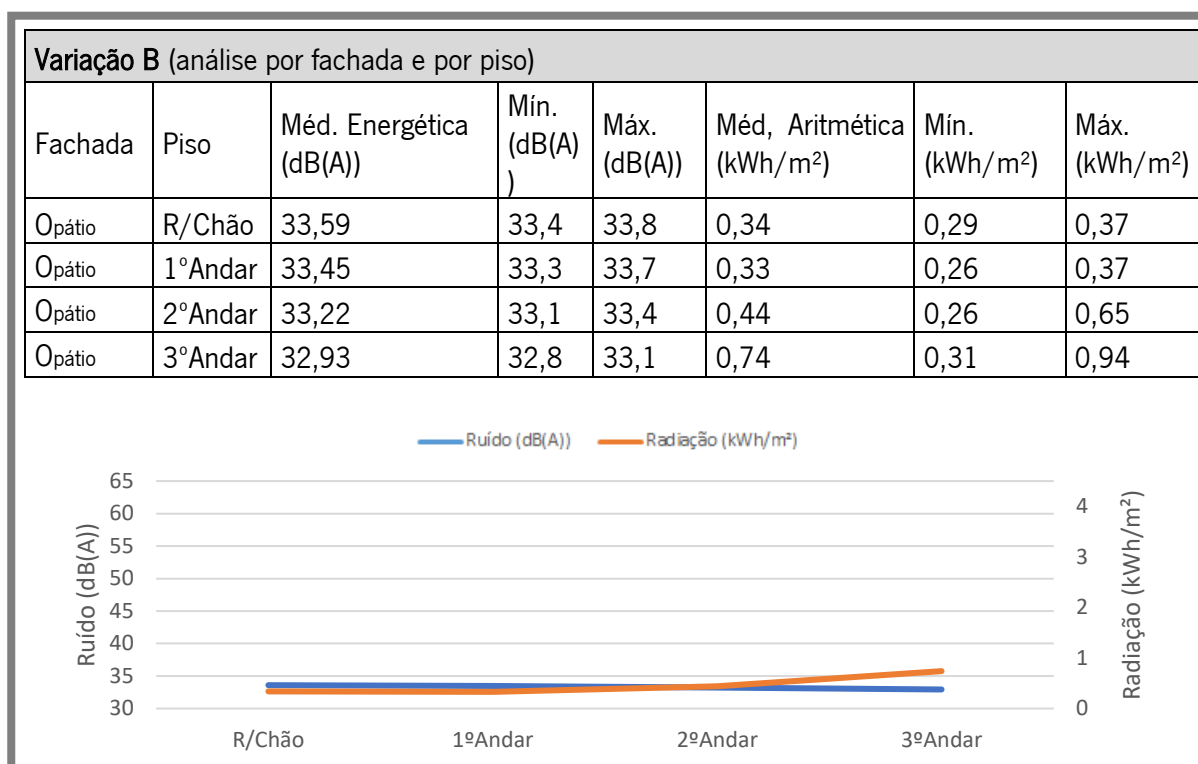


Tabela 86:Variação B (análise por fachada e por piso) (fachada Opátio)



Variação C

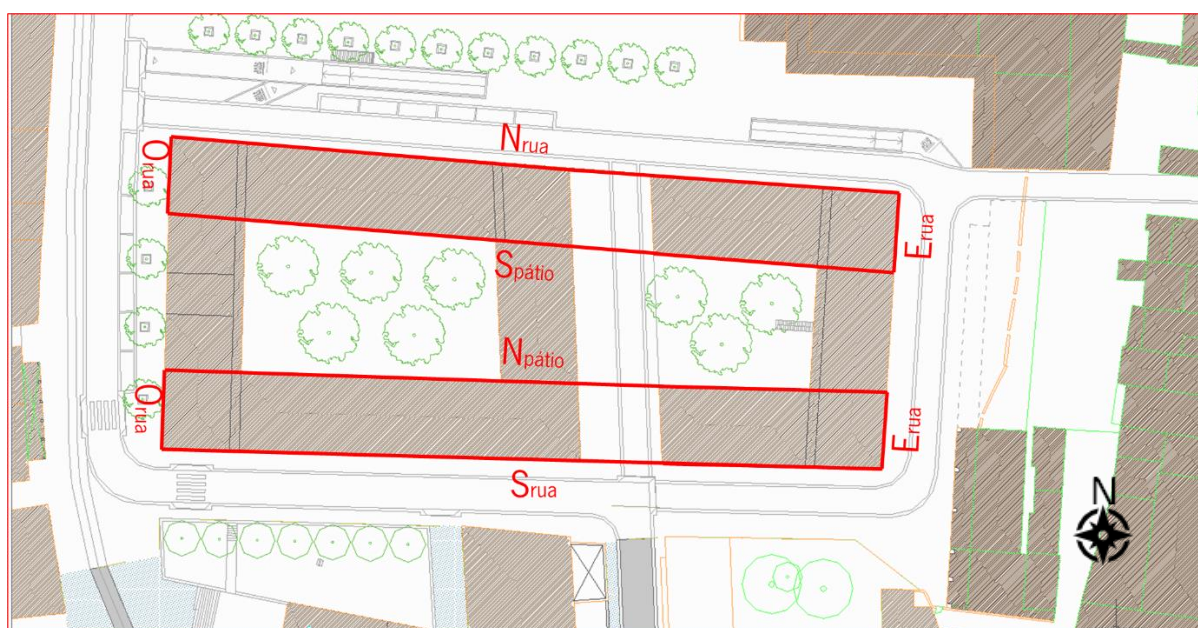


Figura 80: Ilustração da variação C

Tabela 87: Variação C (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)

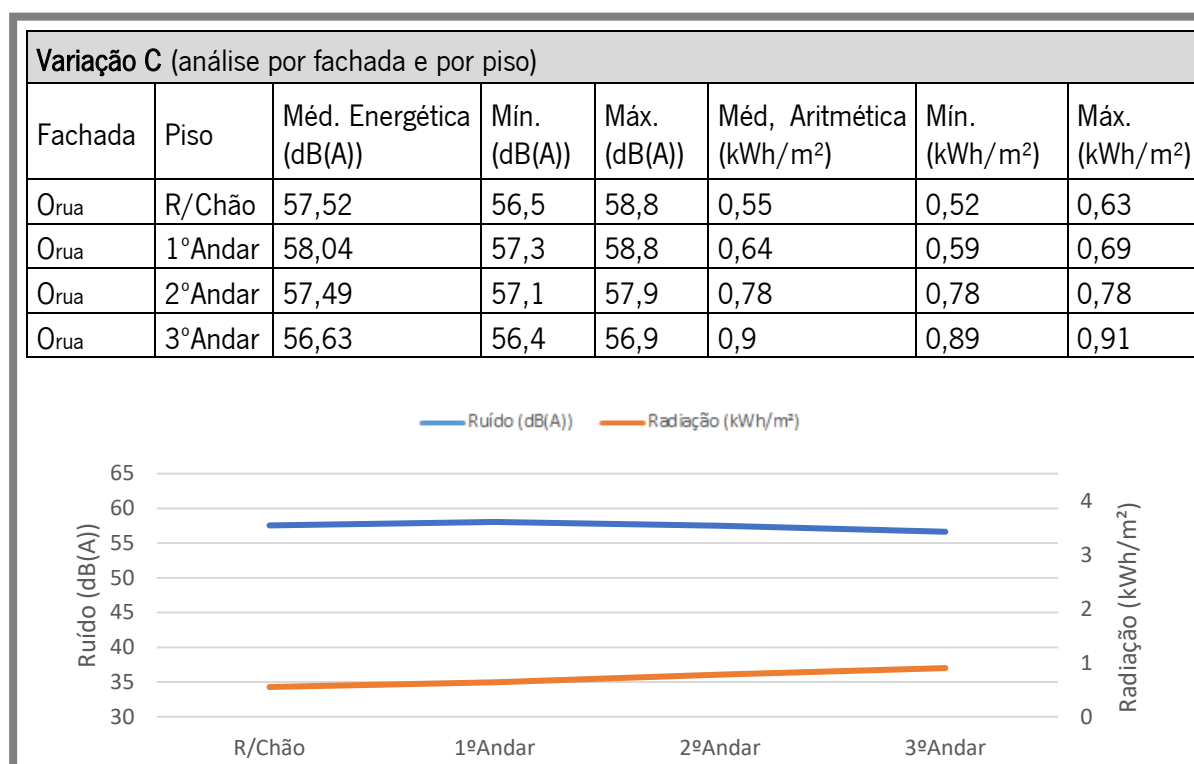


Tabela 88: Variação C (análise por fachada e por piso) (fachada Nrua)

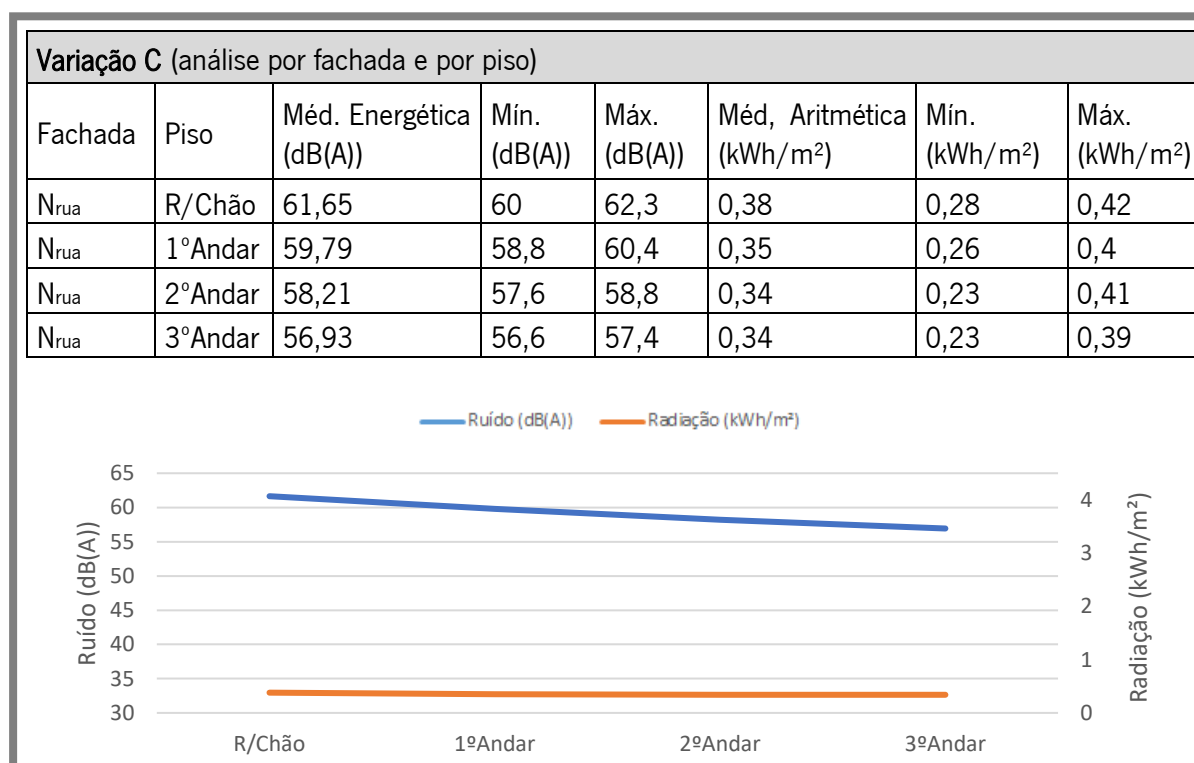


Tabela 89: Variação C (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio)

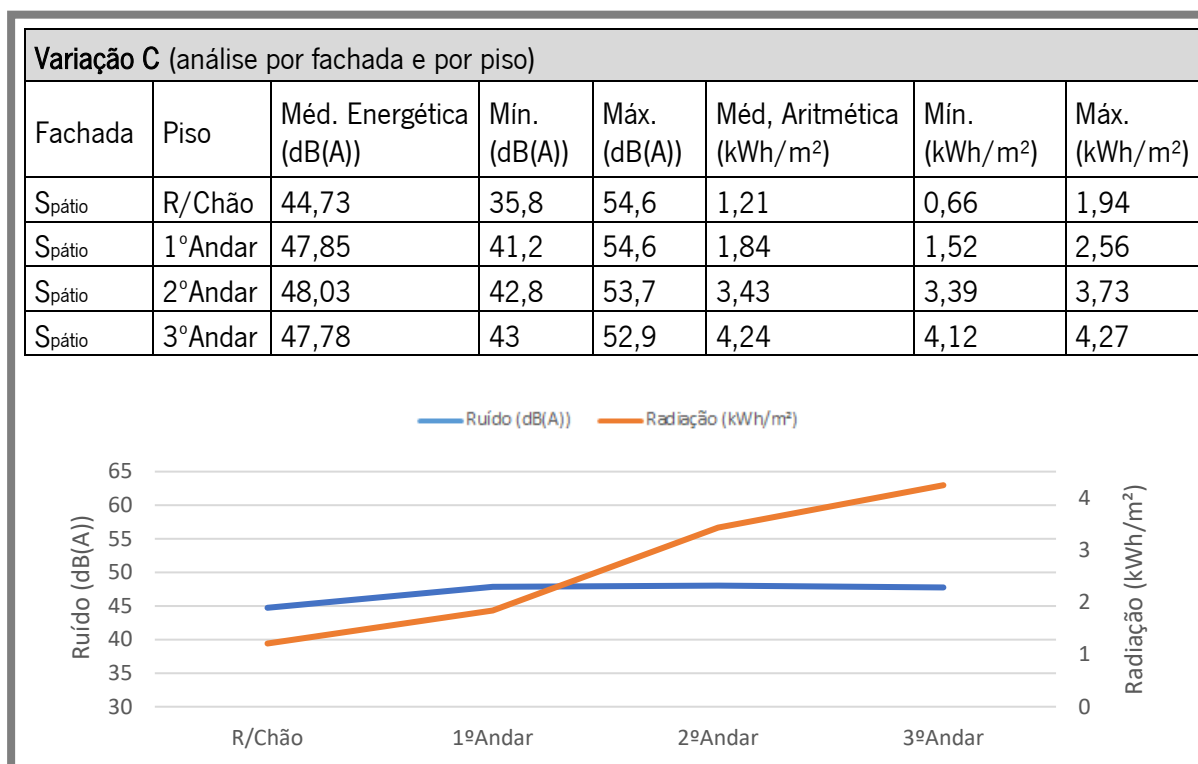


Tabela 90: Variação C (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)

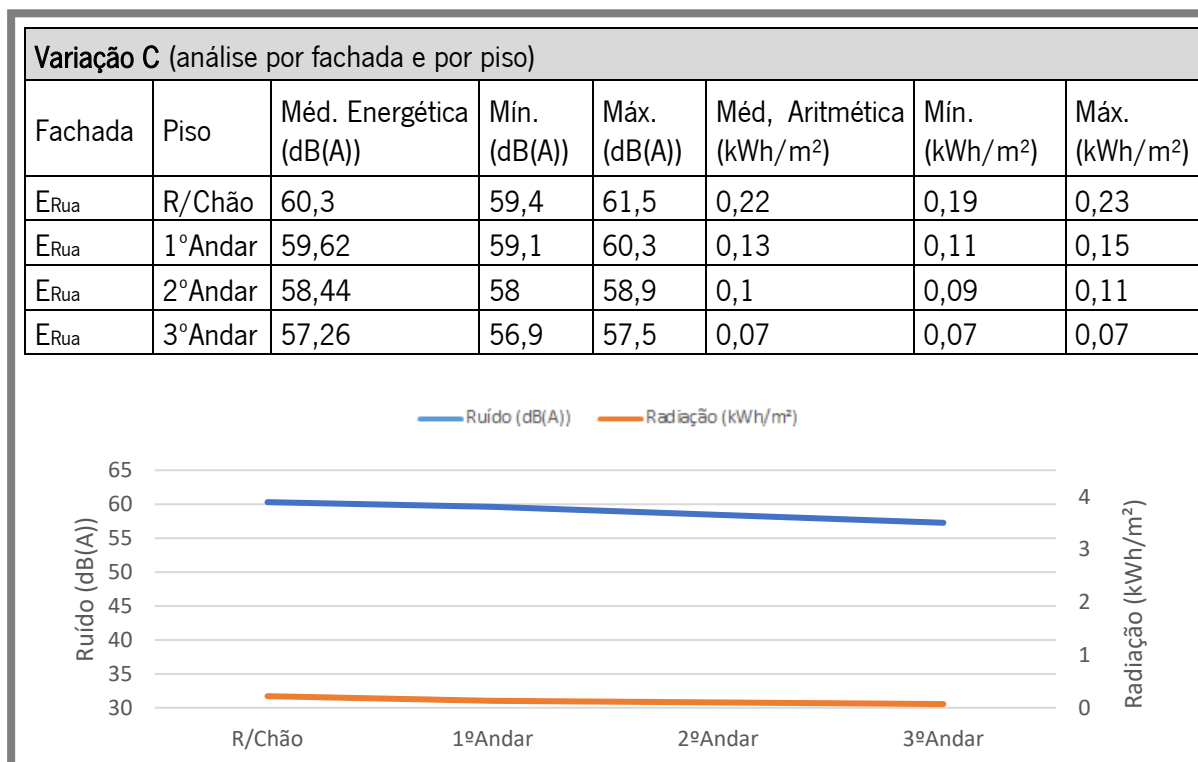


Tabela 91: Variação C (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)

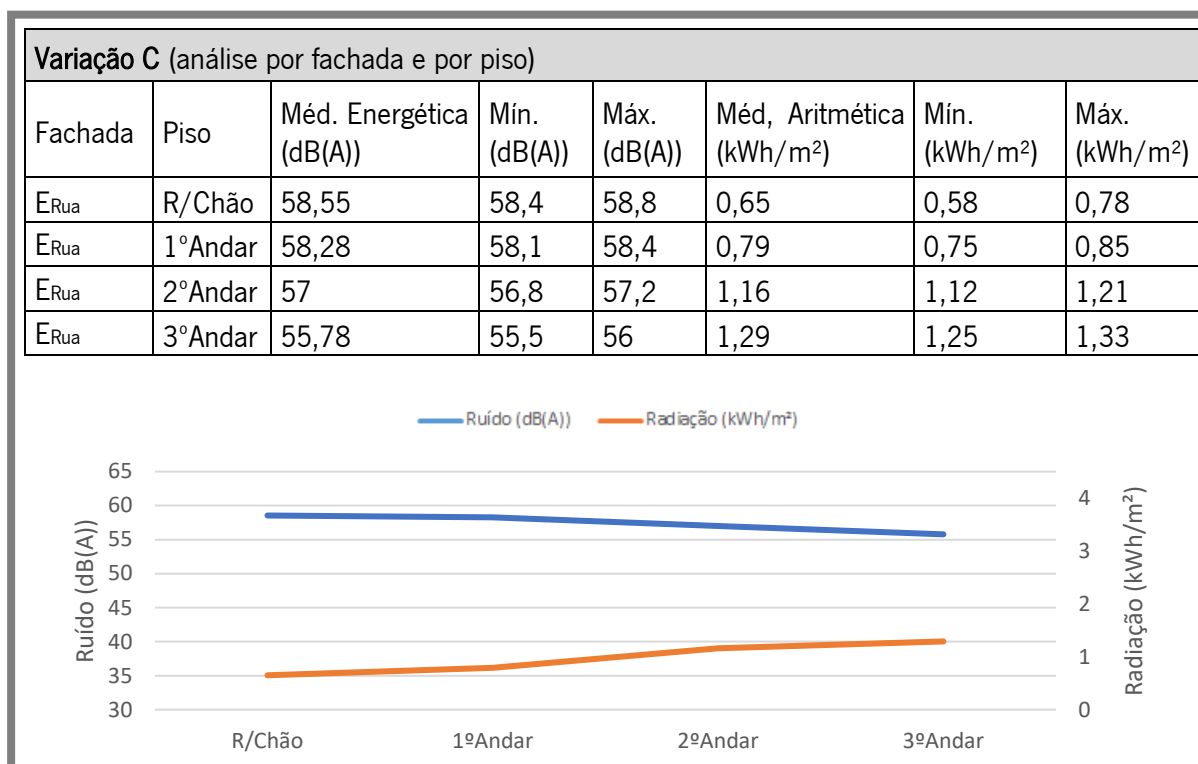


Tabela 92: Variação C (análise por fachada e por piso) (fachada Srua)

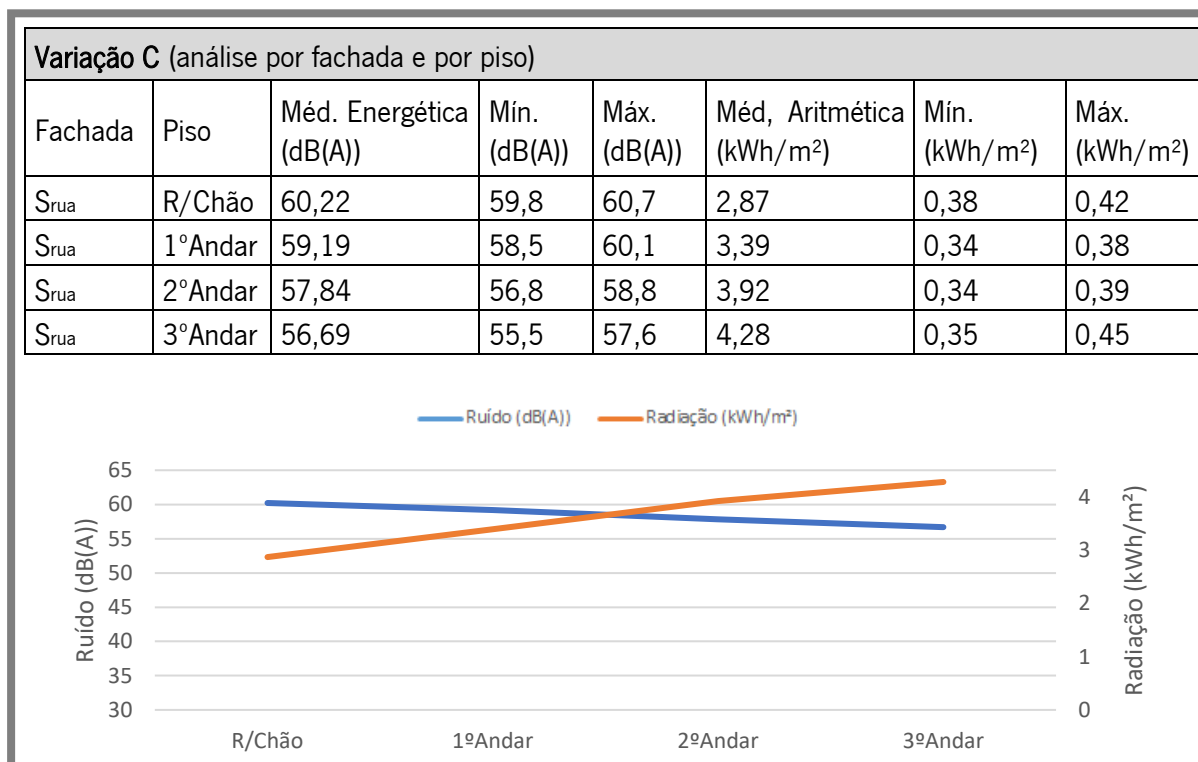


Tabela 93: Variação C (análise por fachada e por piso) (fachada Npátio)

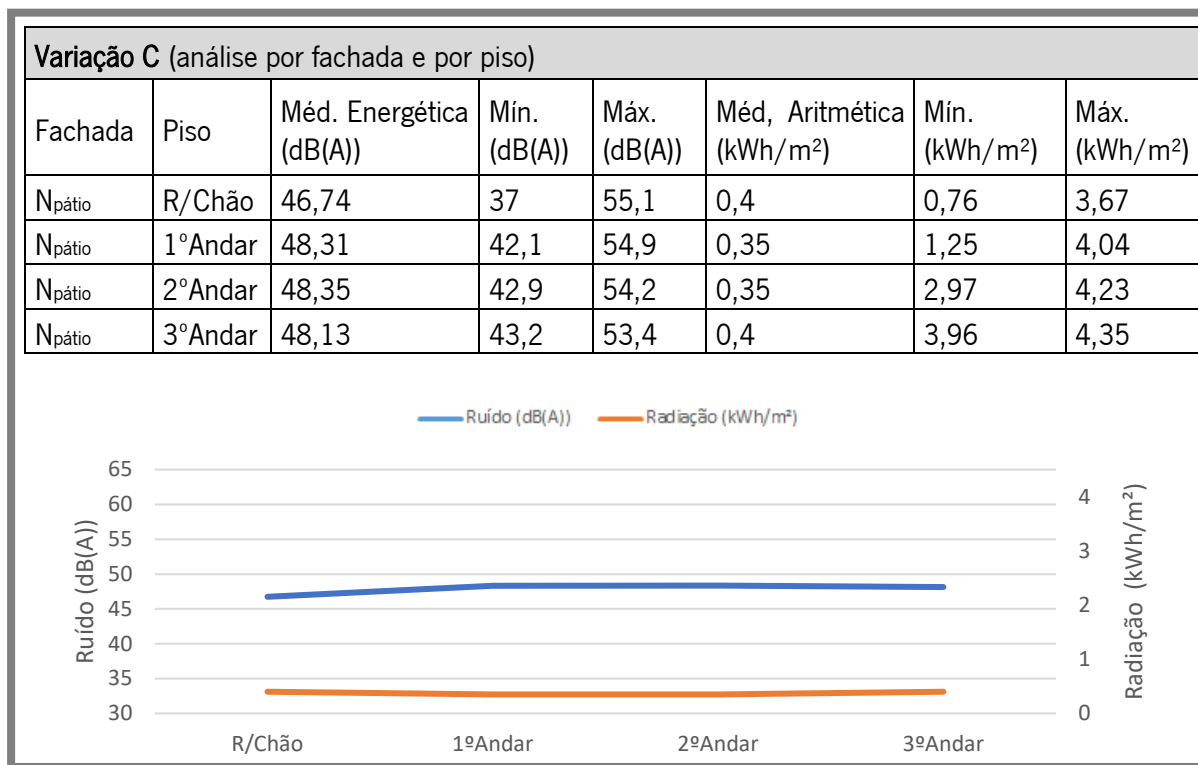
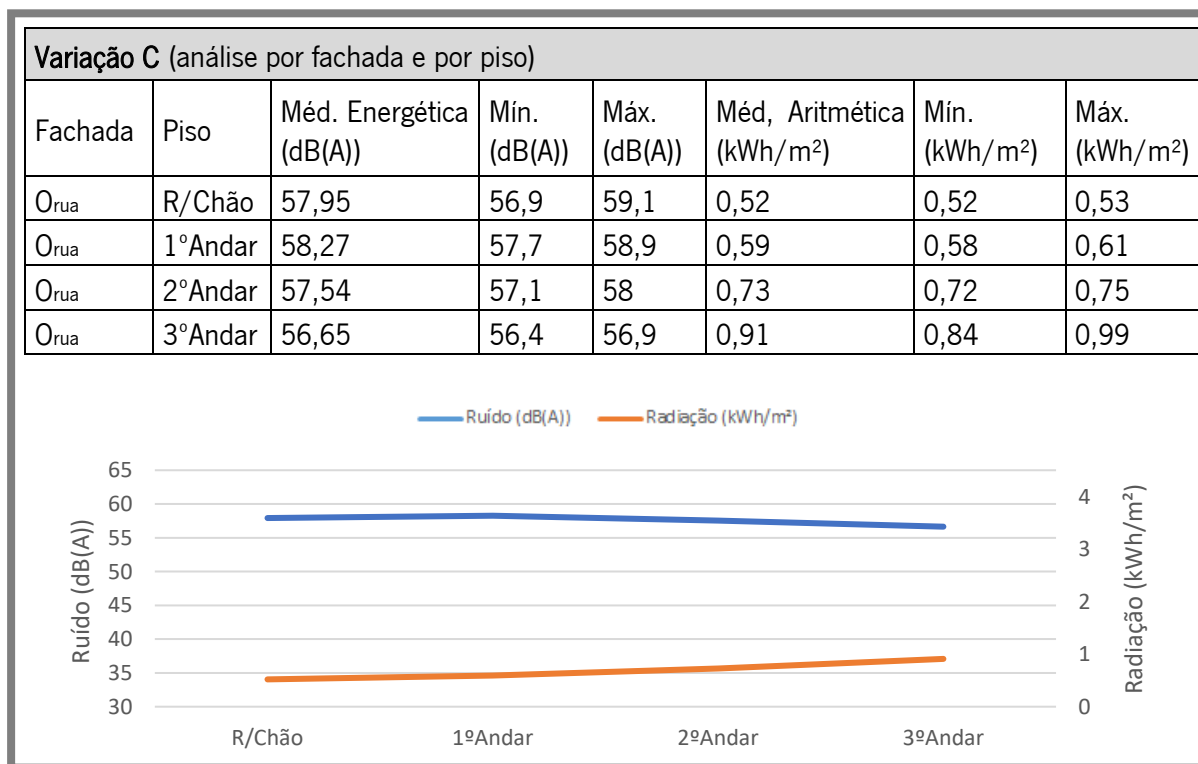


Tabela 94: Variação C (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)



Varição D

Para a forma original variação D

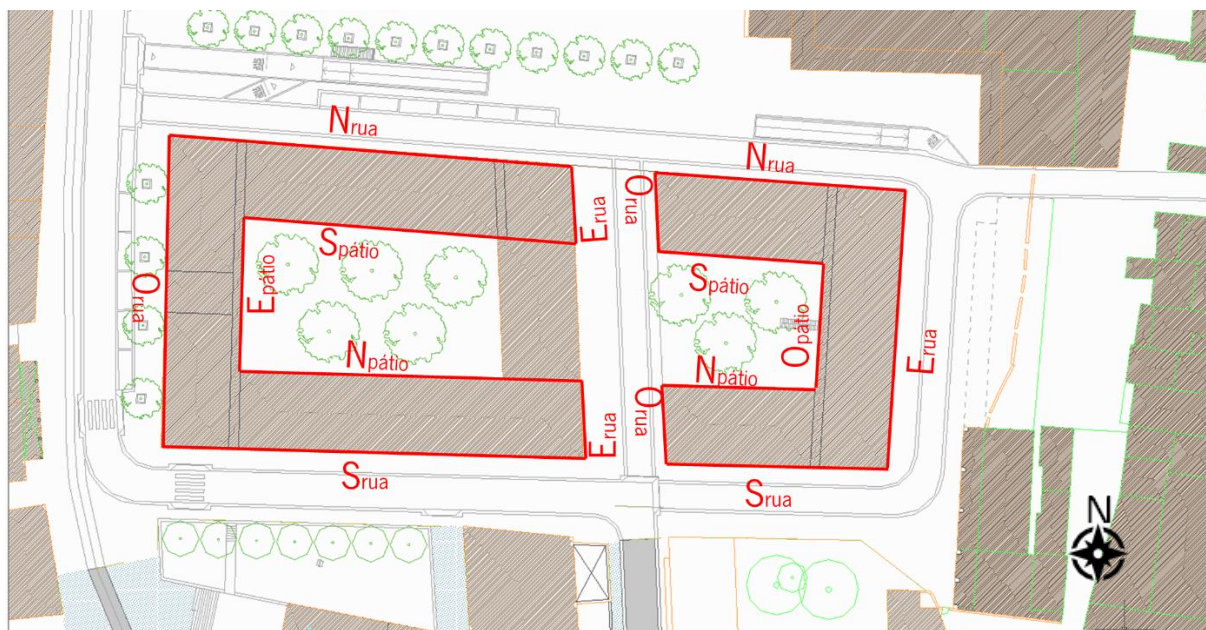


Figura 81: Ilustração da variação D

Tabela 95: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)

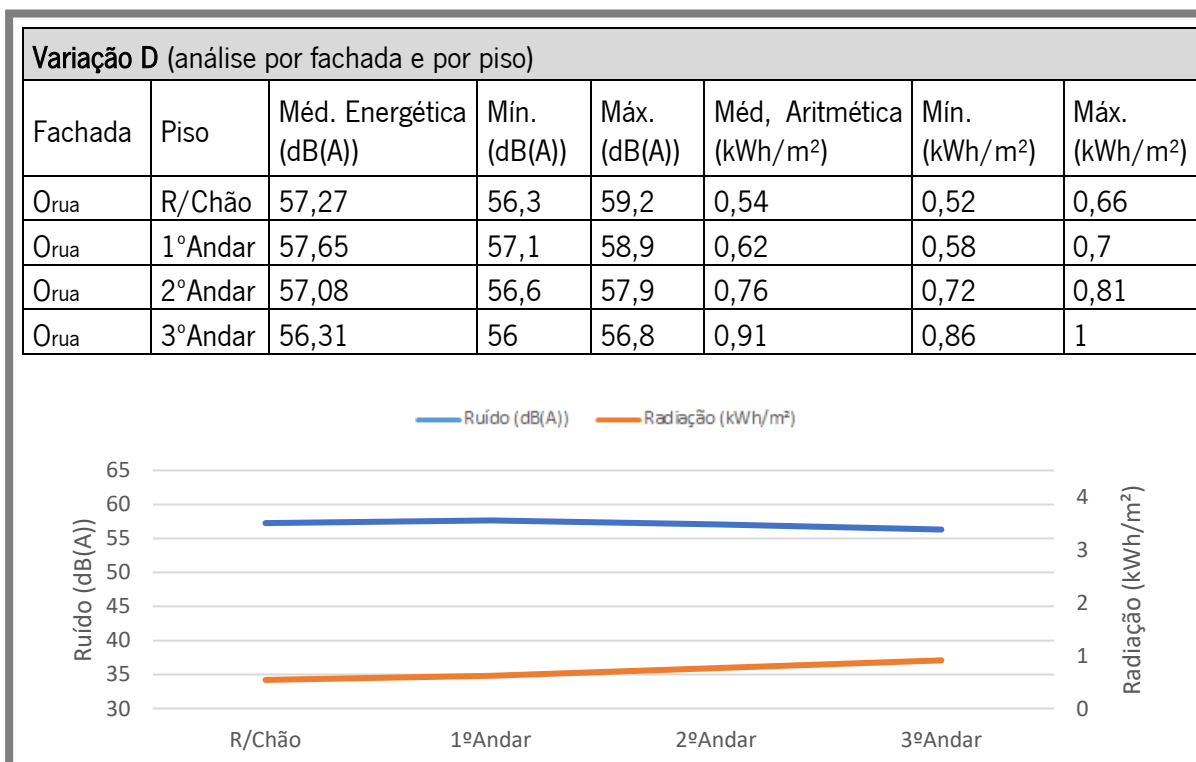


Tabela 96: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Epátio)

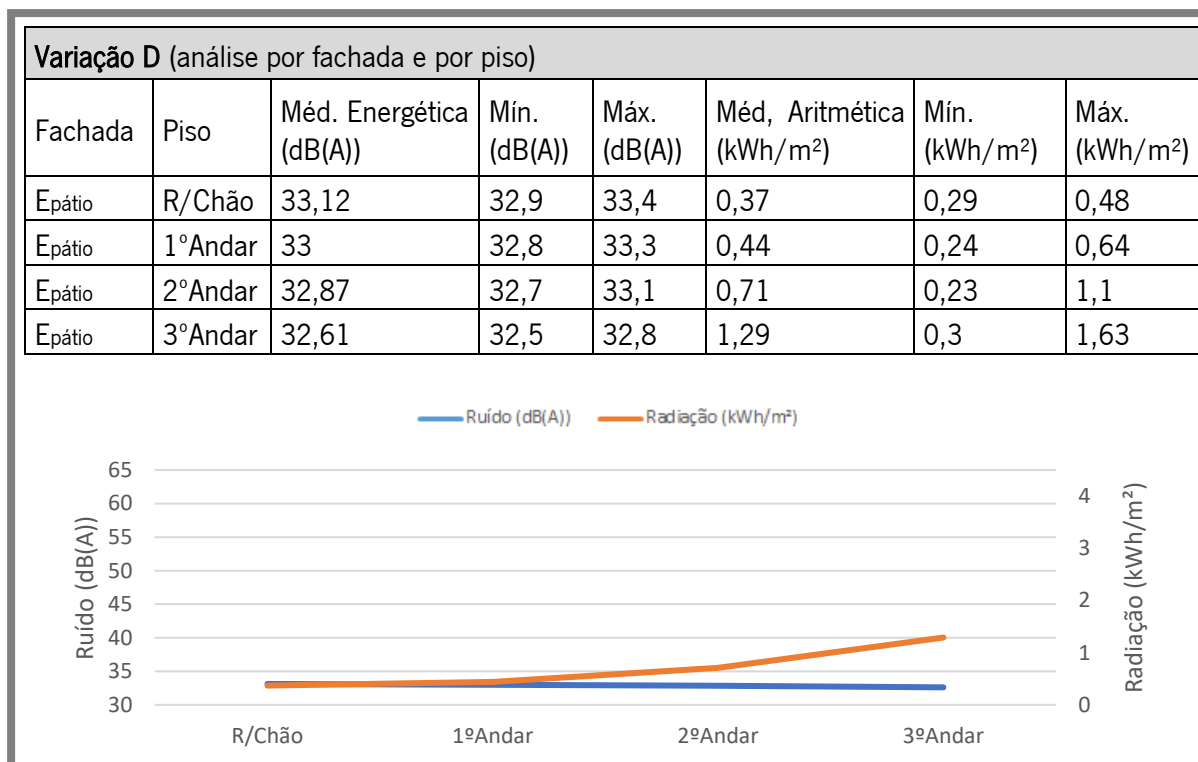


Tabela 97: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Nrua)

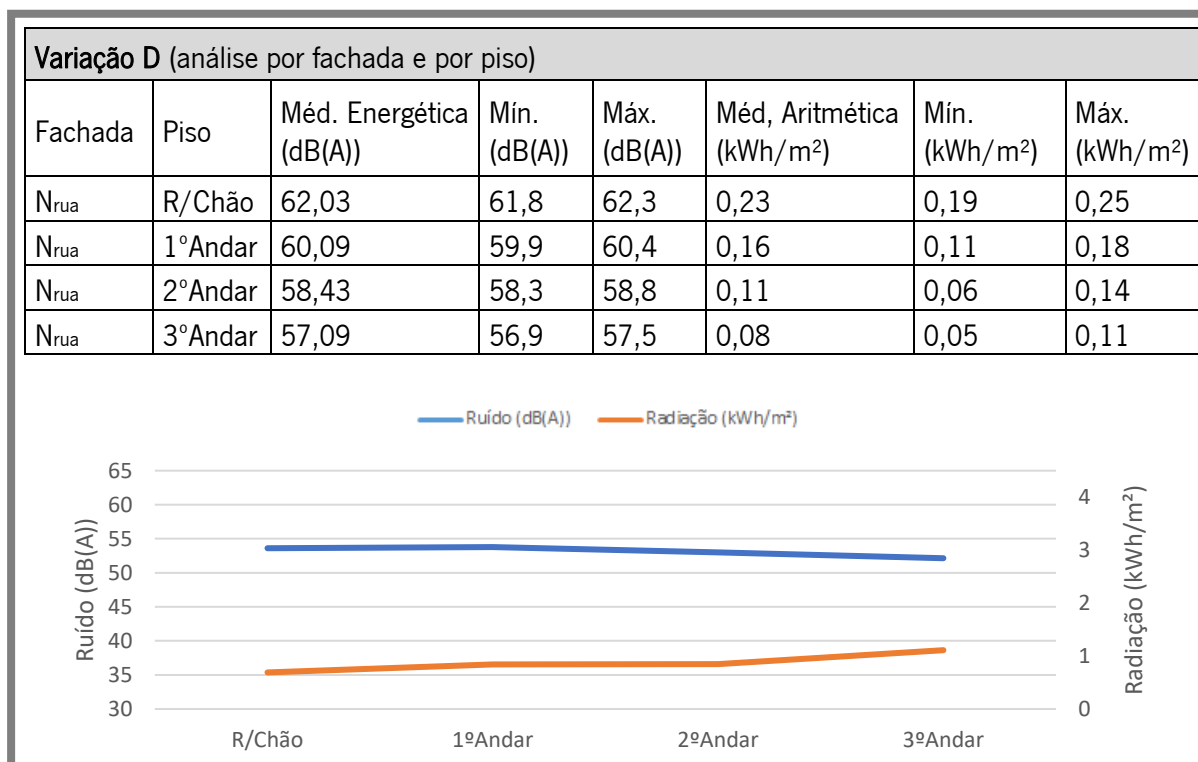


Tabela 98: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio)

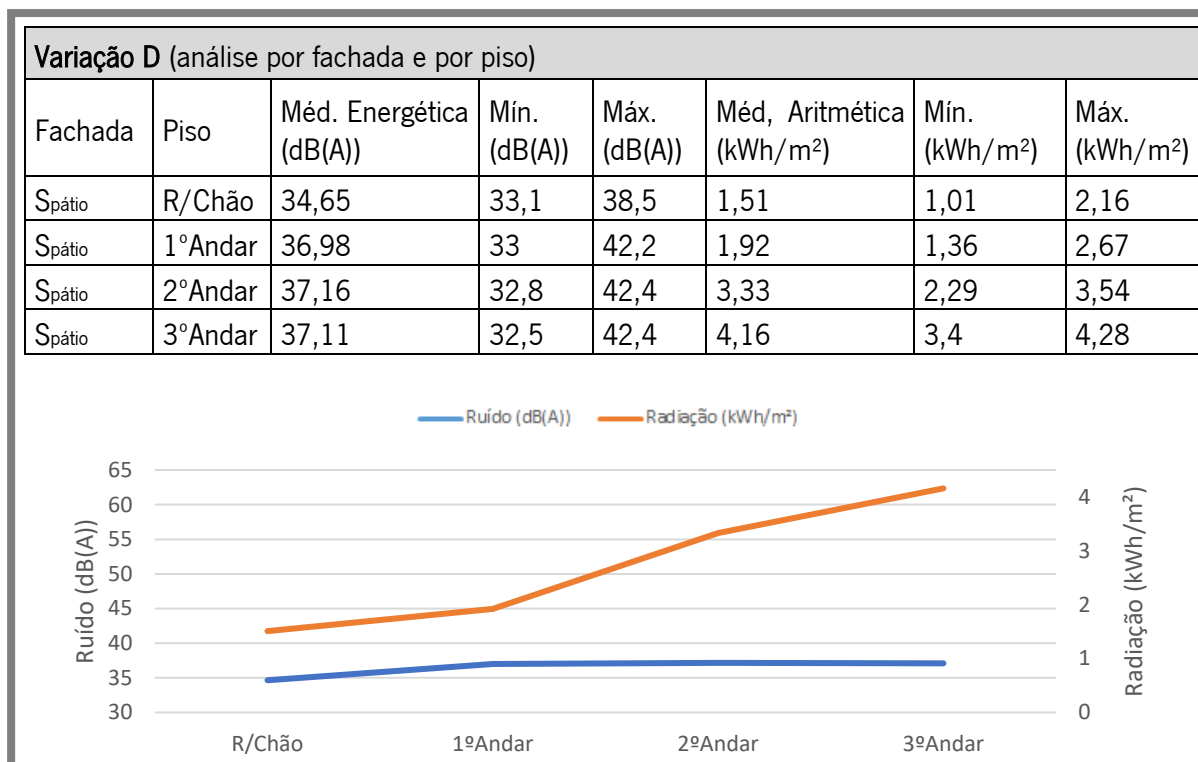


Tabela 99: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)

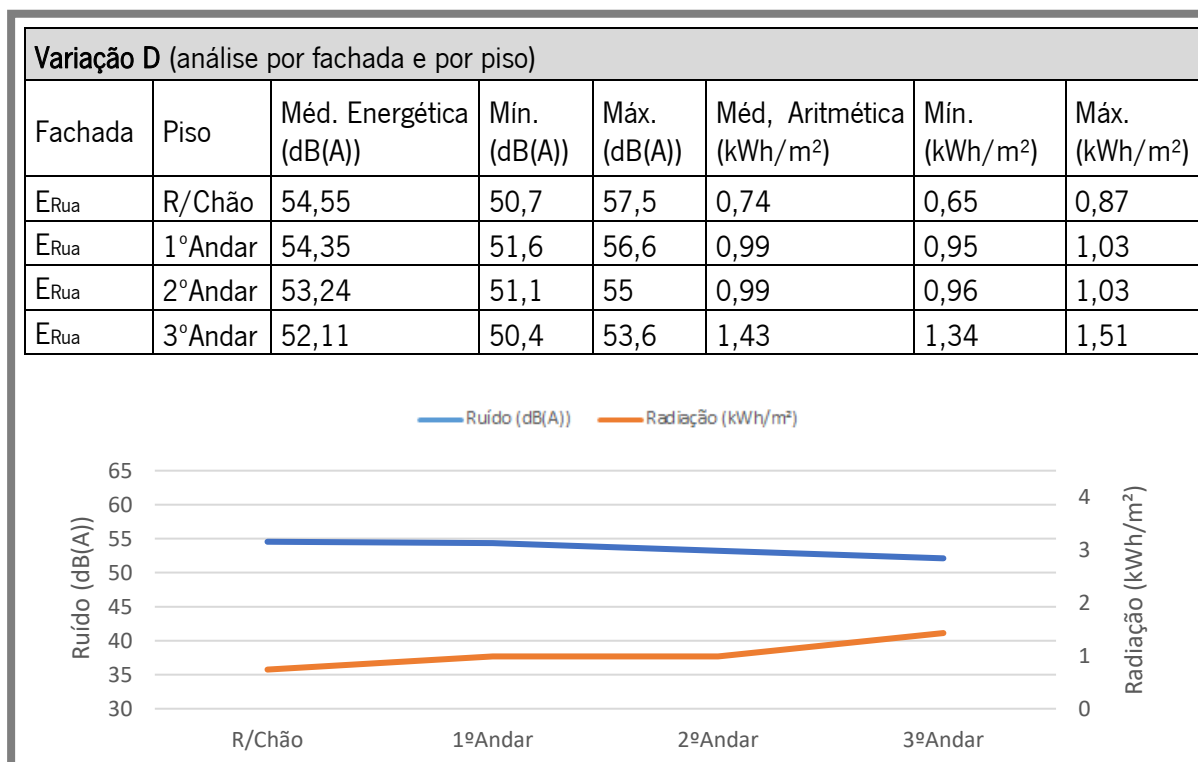


Tabela 100: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)

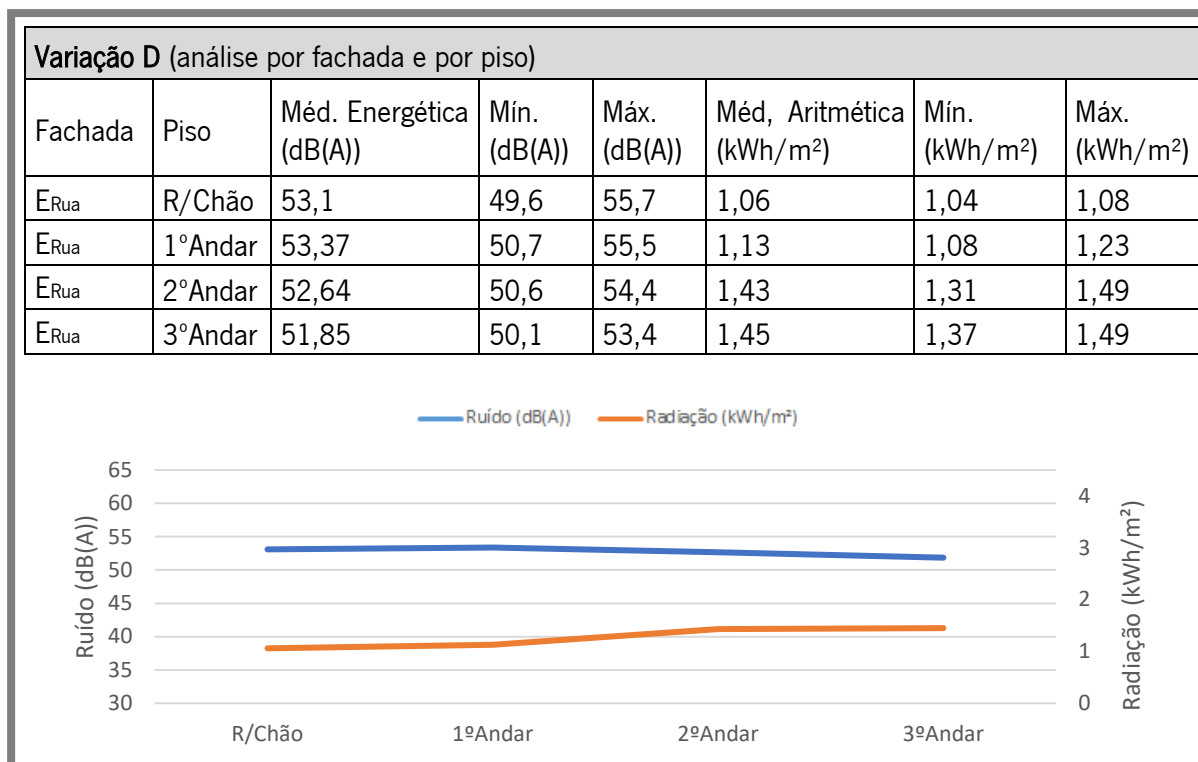


Tabela 101: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Srua)

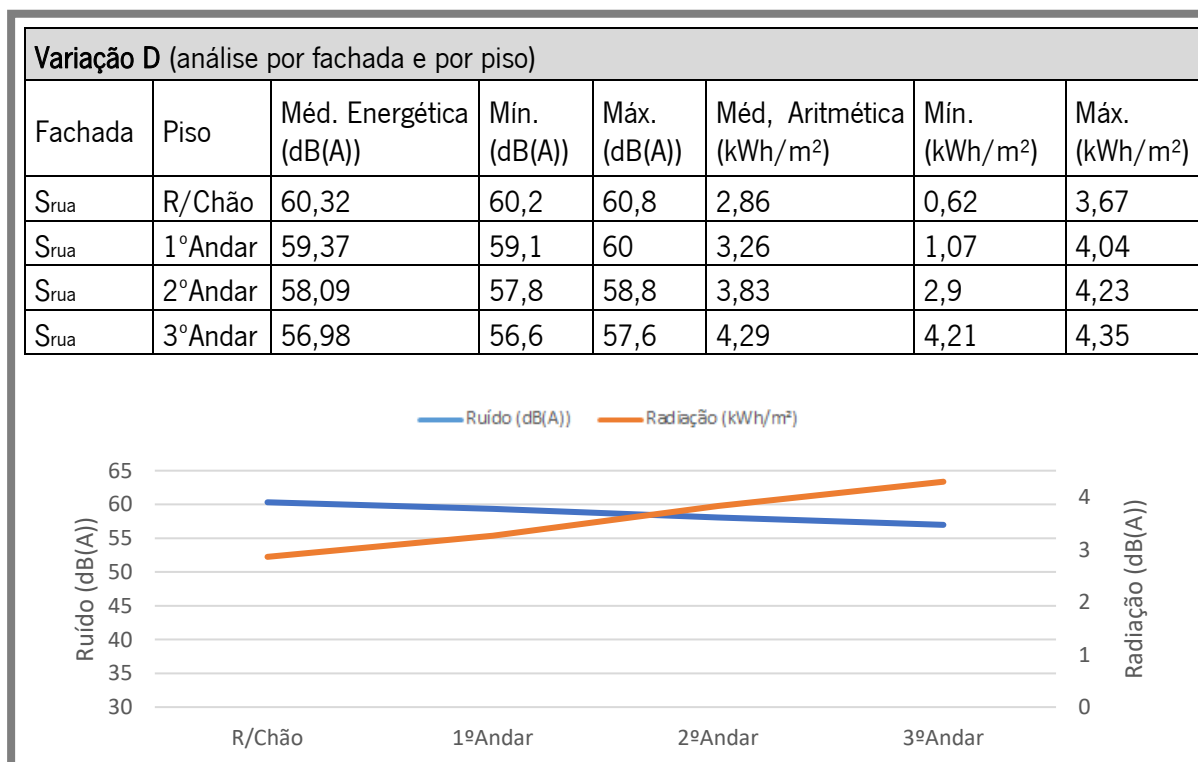


Tabela 102: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Npátio)

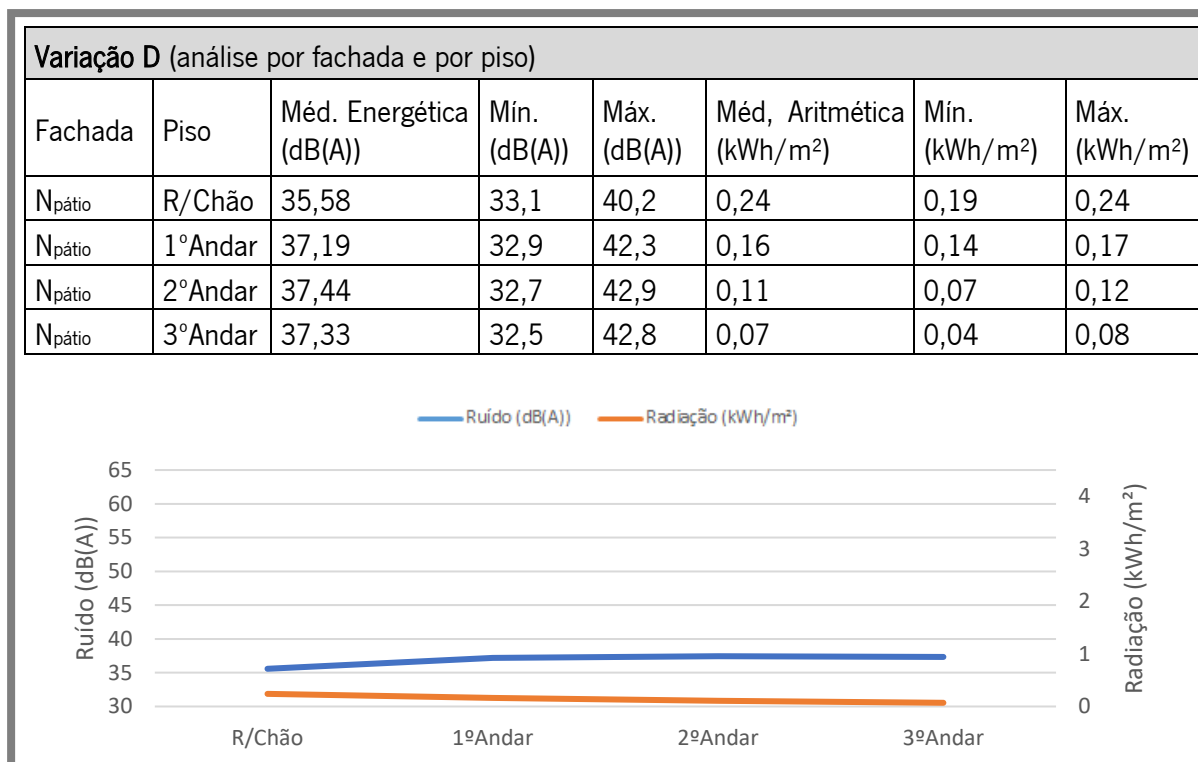


Tabela 103: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)

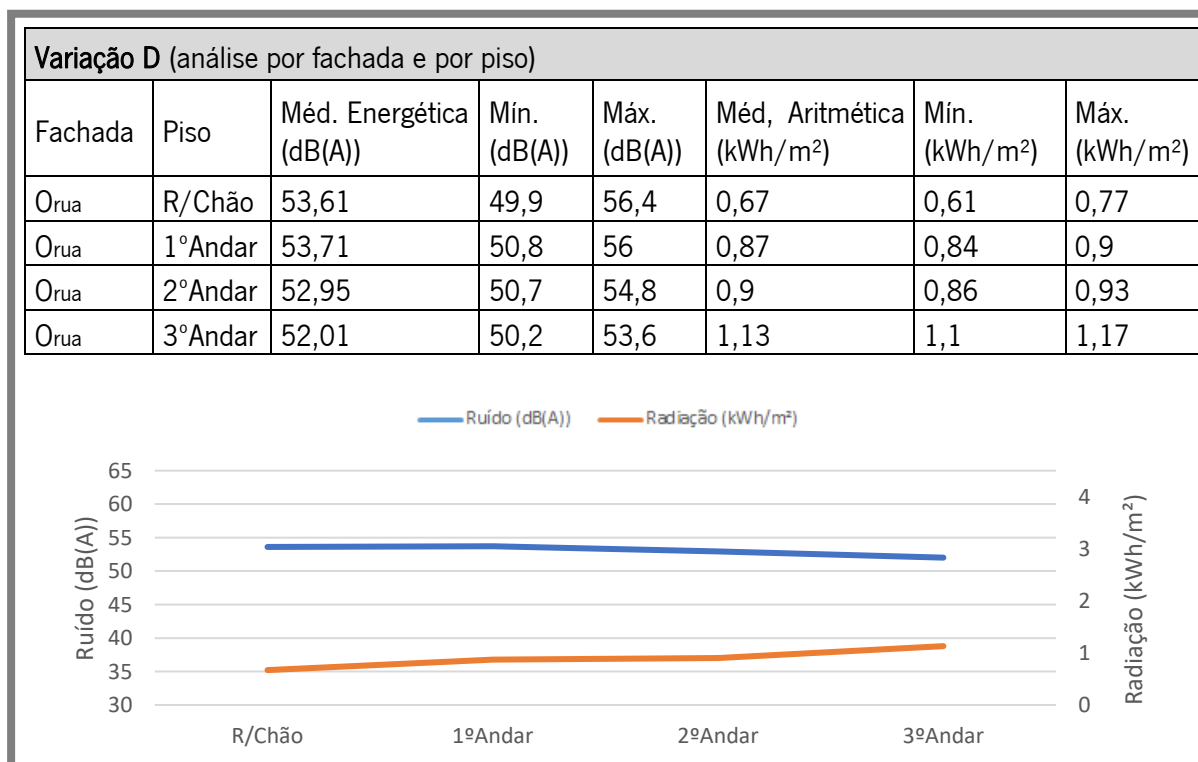


Tabela 104: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Nrua)

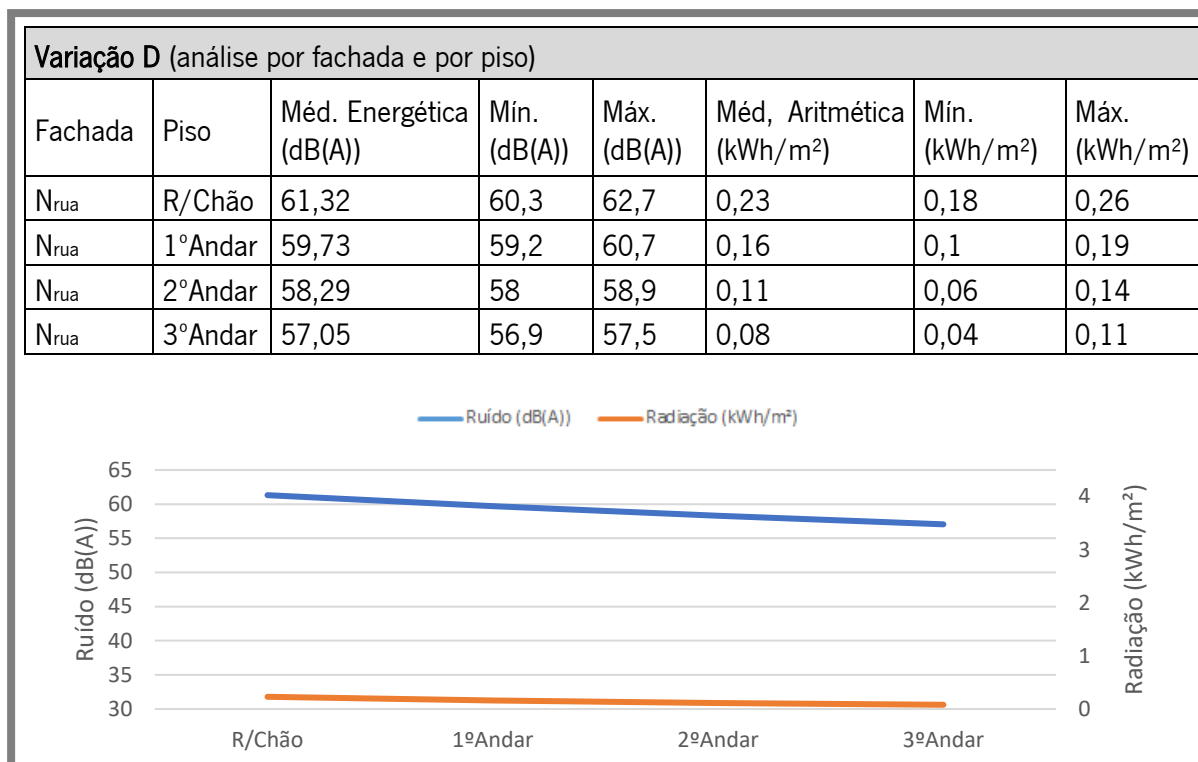


Tabela 105: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio)

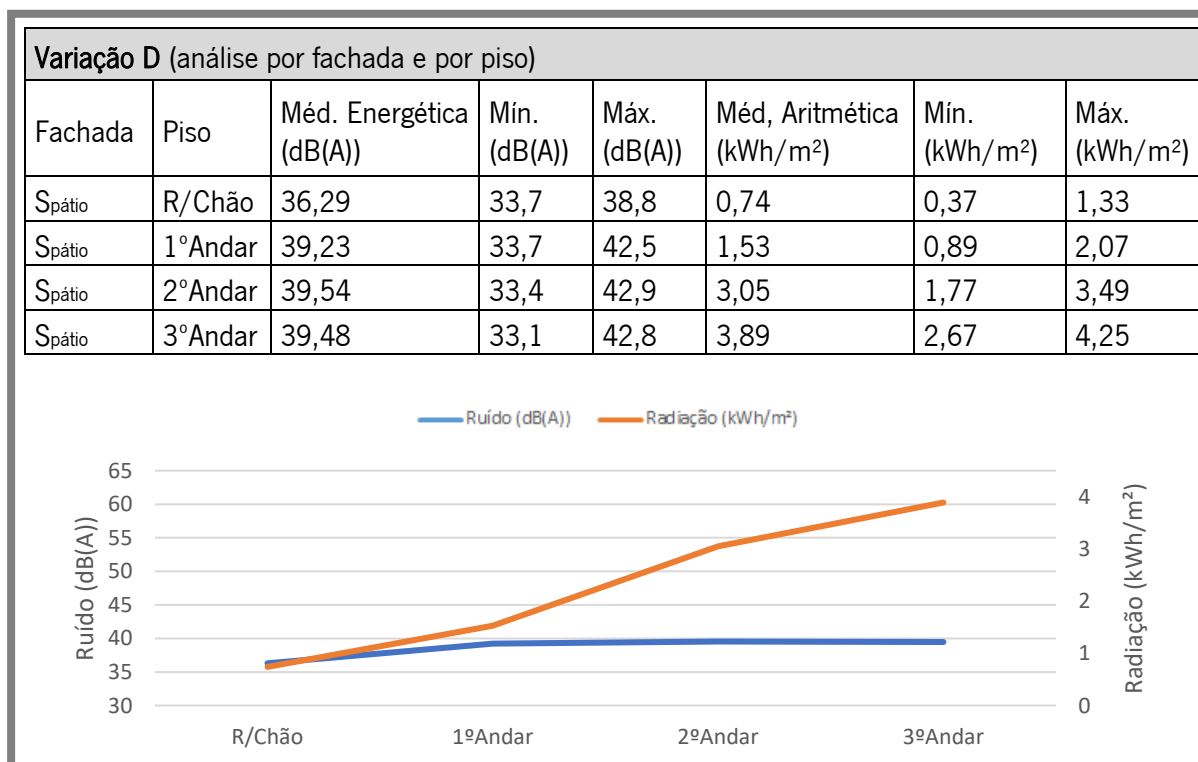


Tabela 106: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)

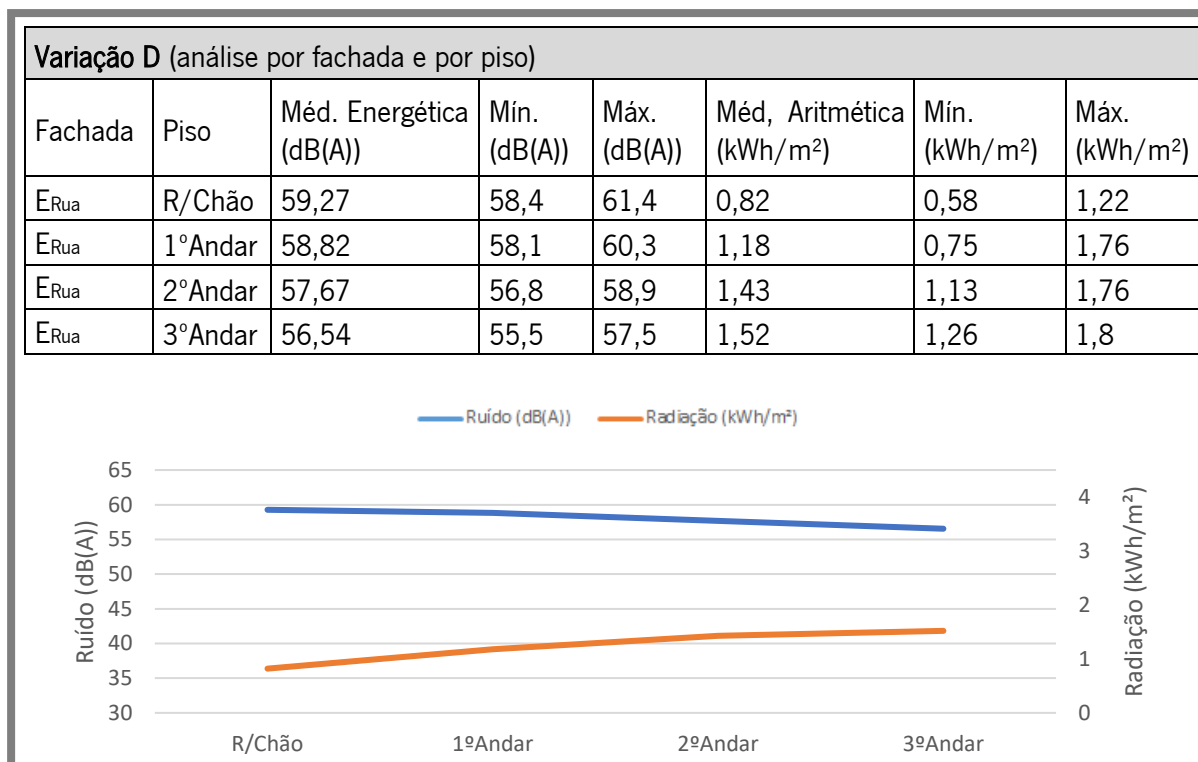


Tabela 107: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Opátio)

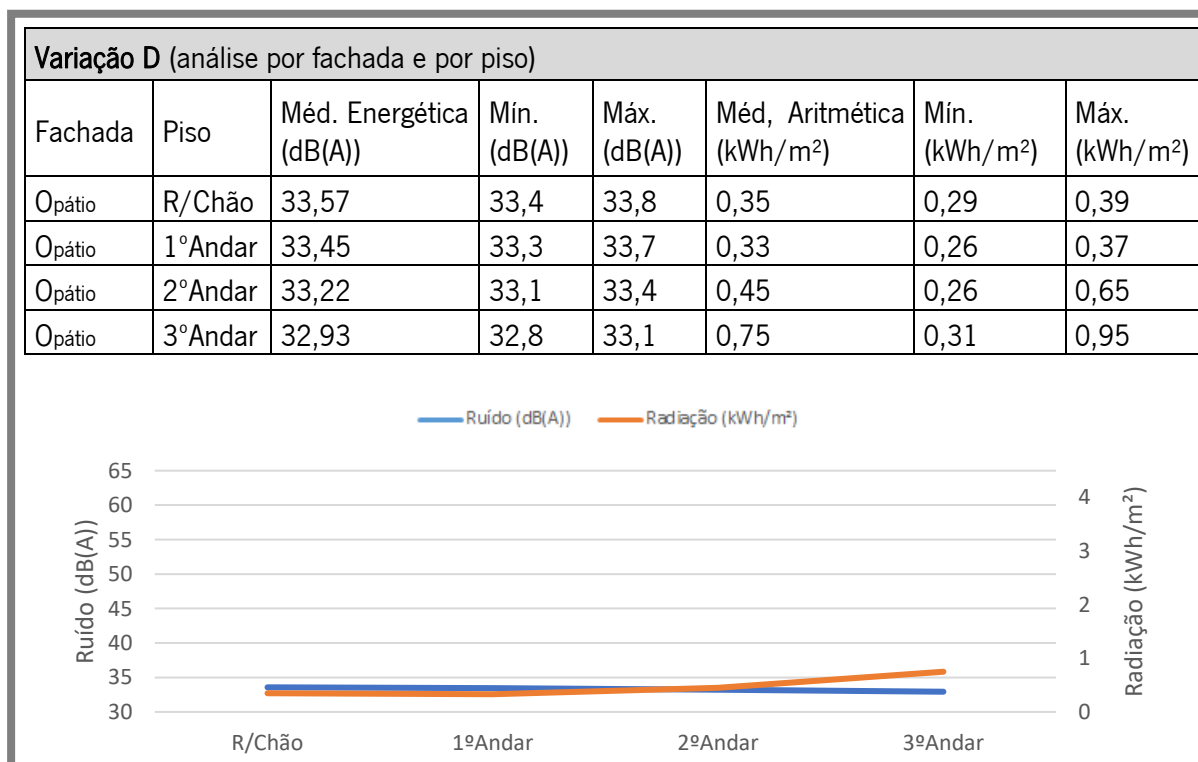


Tabela 108: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Srua)

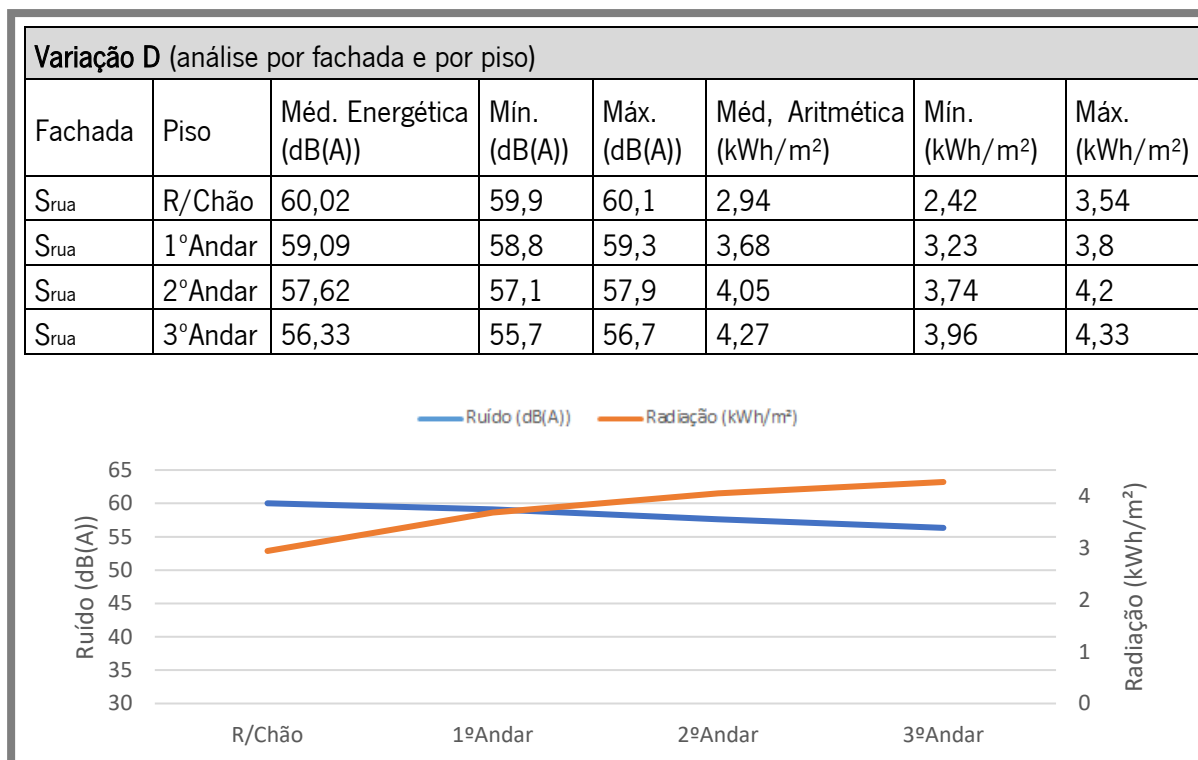


Tabela 109: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Npátio)

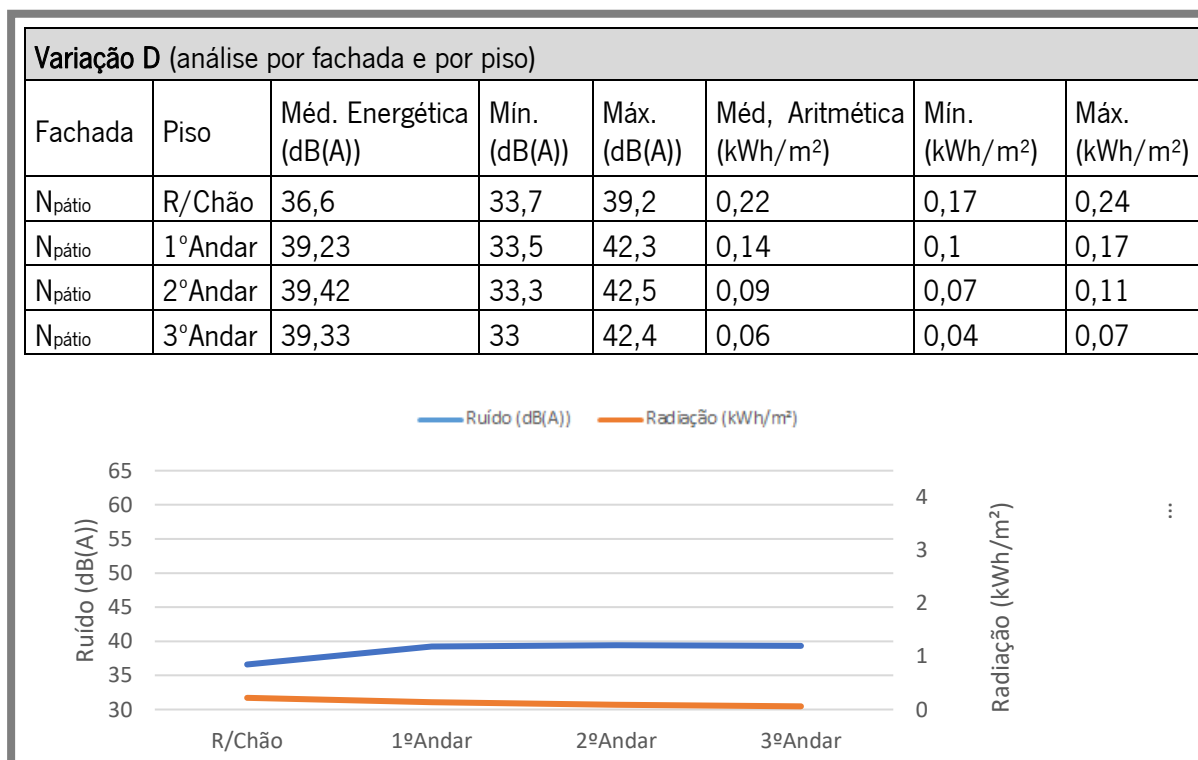
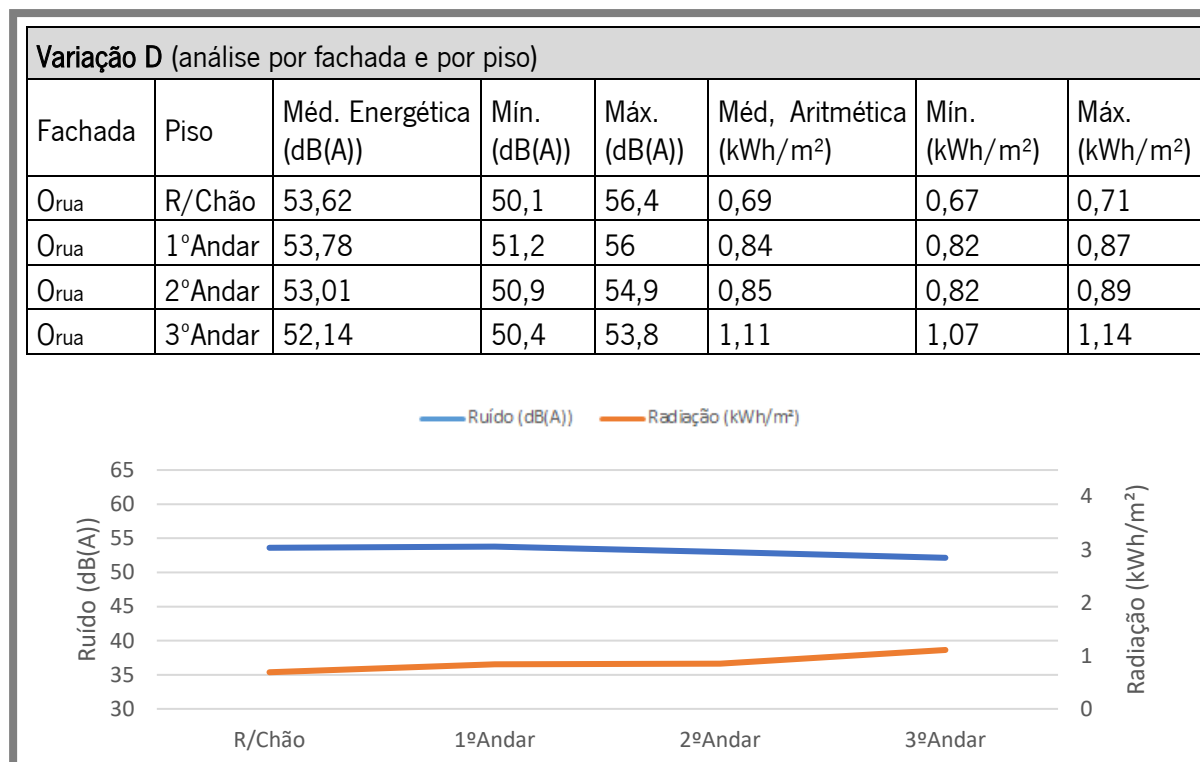


Tabela 110: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)



Variação E

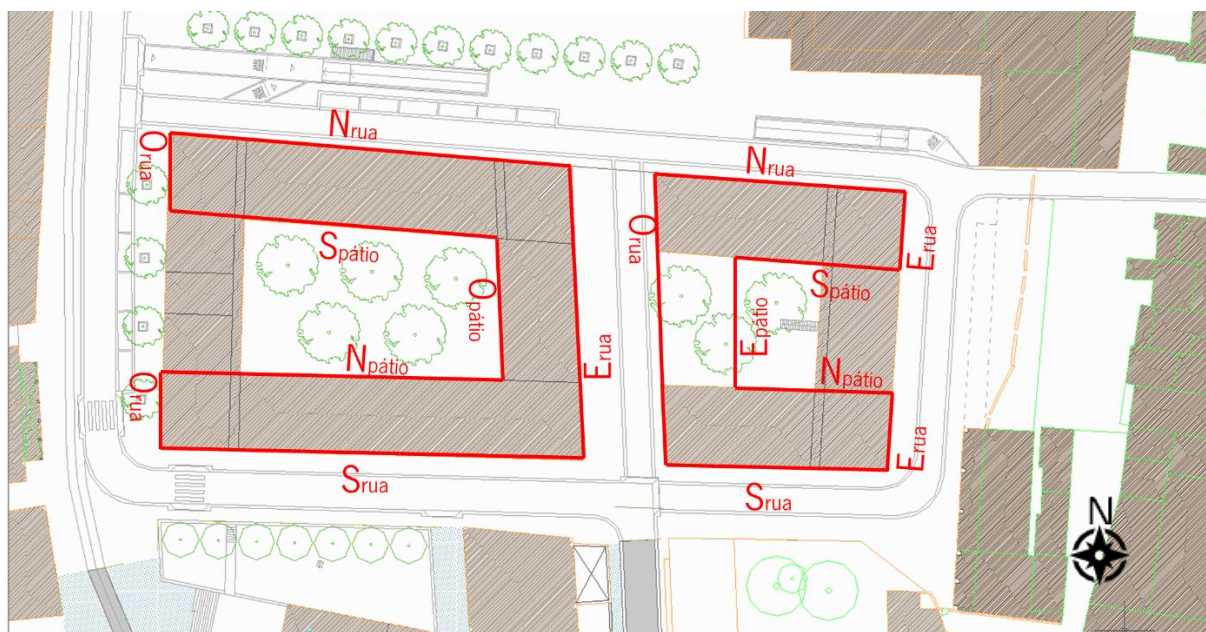


Figura 82: Ilustração da variação E

Tabela 111: Variação E (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)

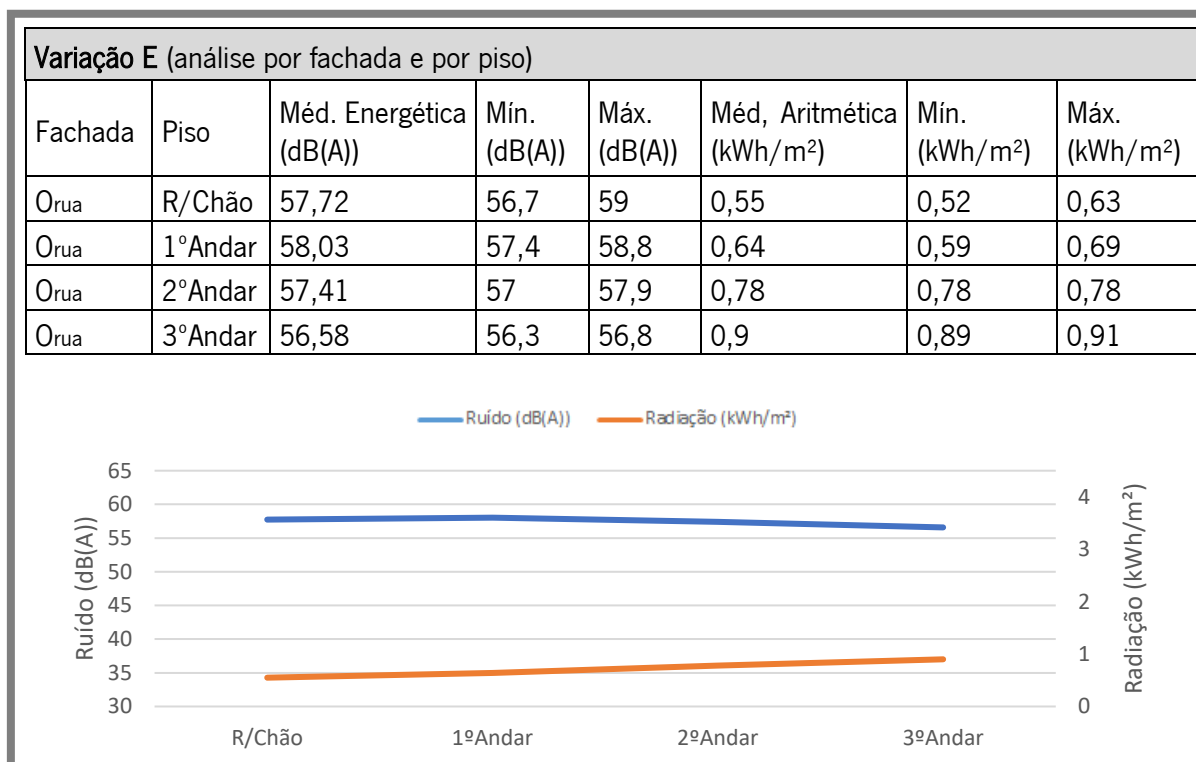


Tabela 112: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Nrua)

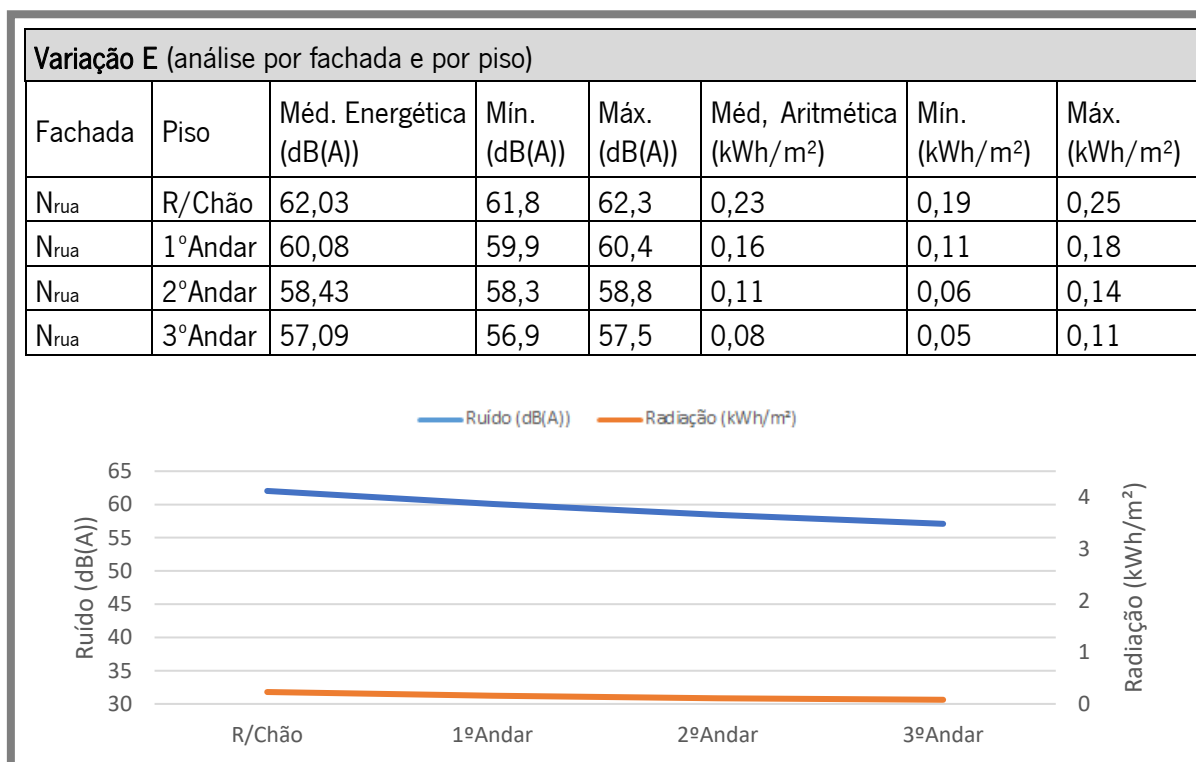


Tabela 113: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio)

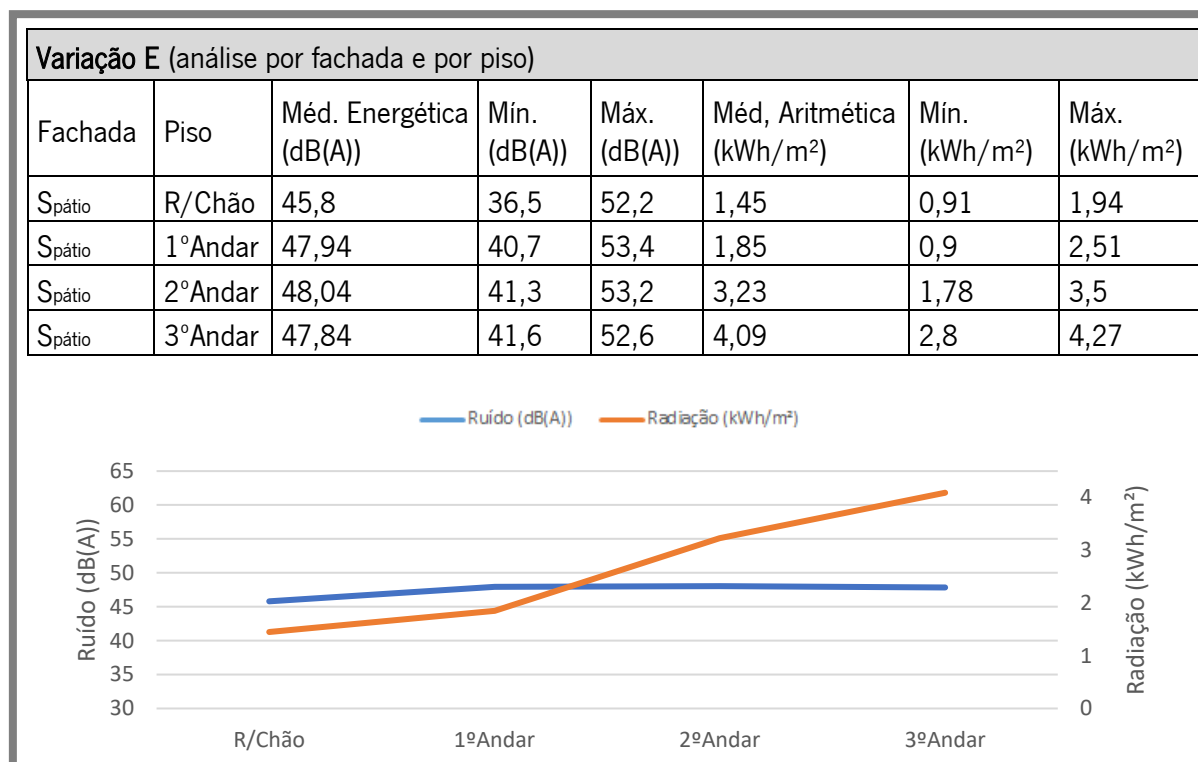


Tabela 114: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Rua)

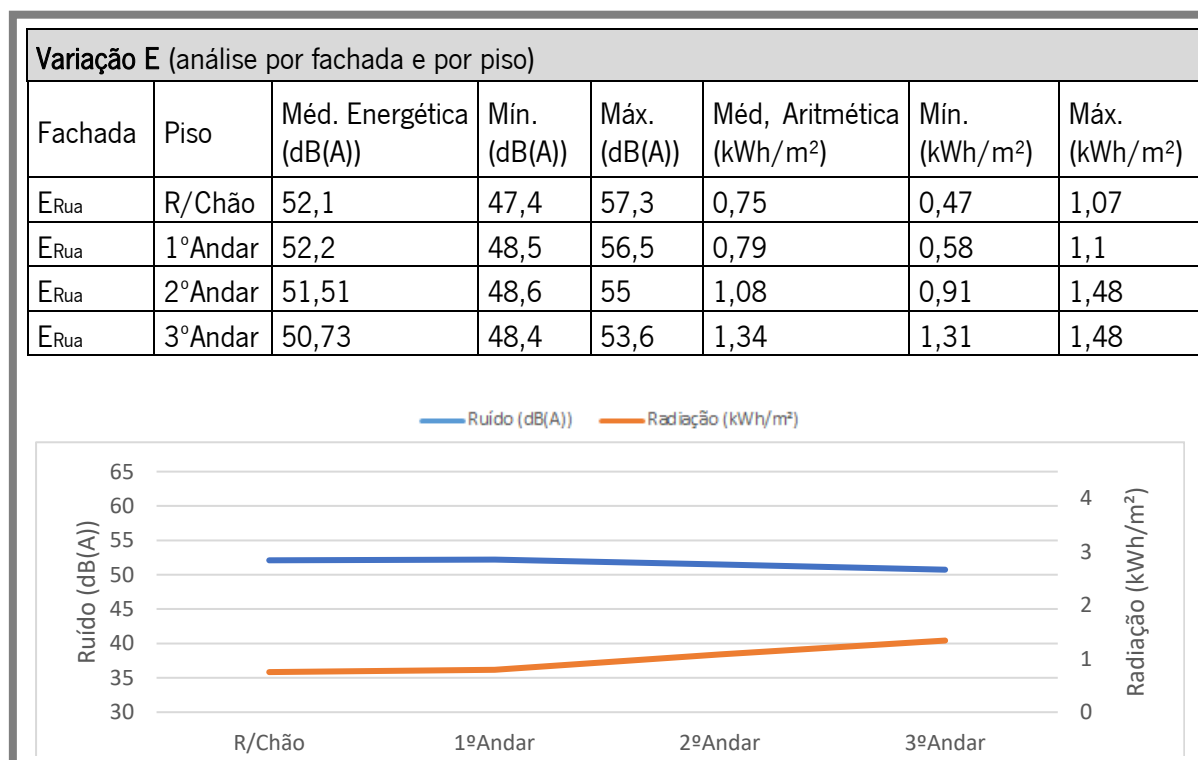


Tabela 115: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Opátio)

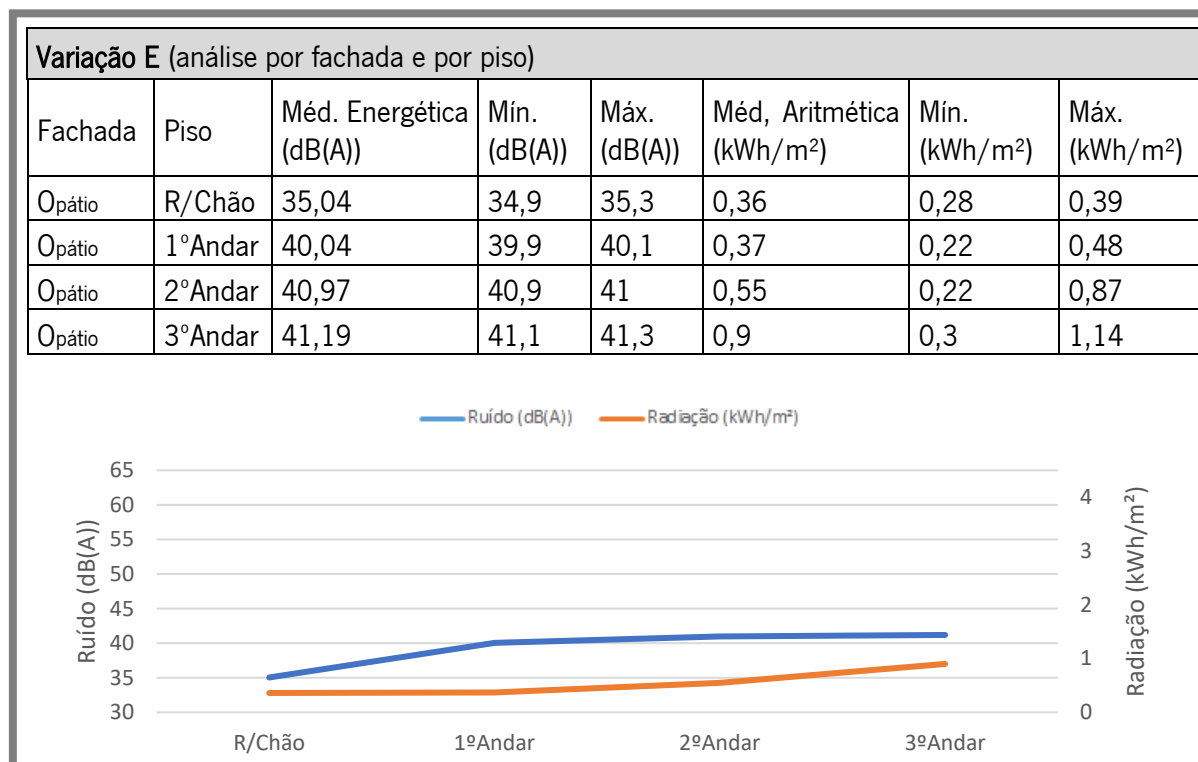


Tabela 116: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Srua)

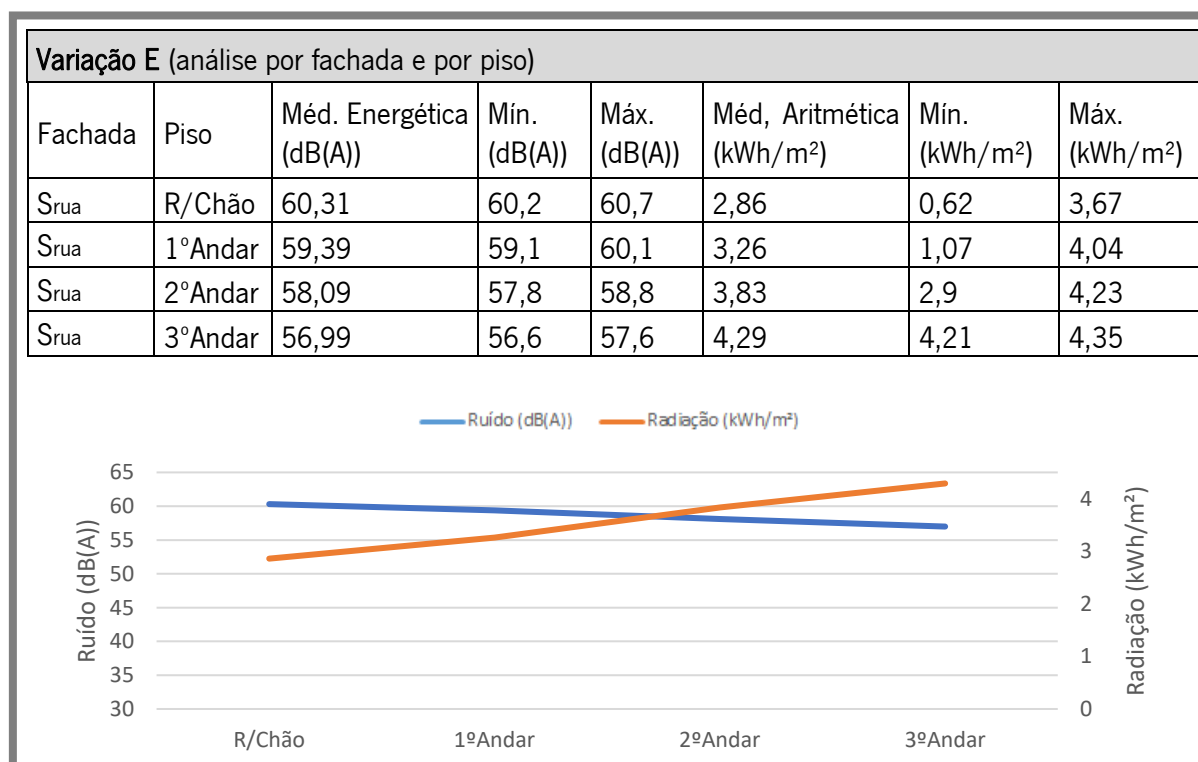


Tabela 117: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Npátio)

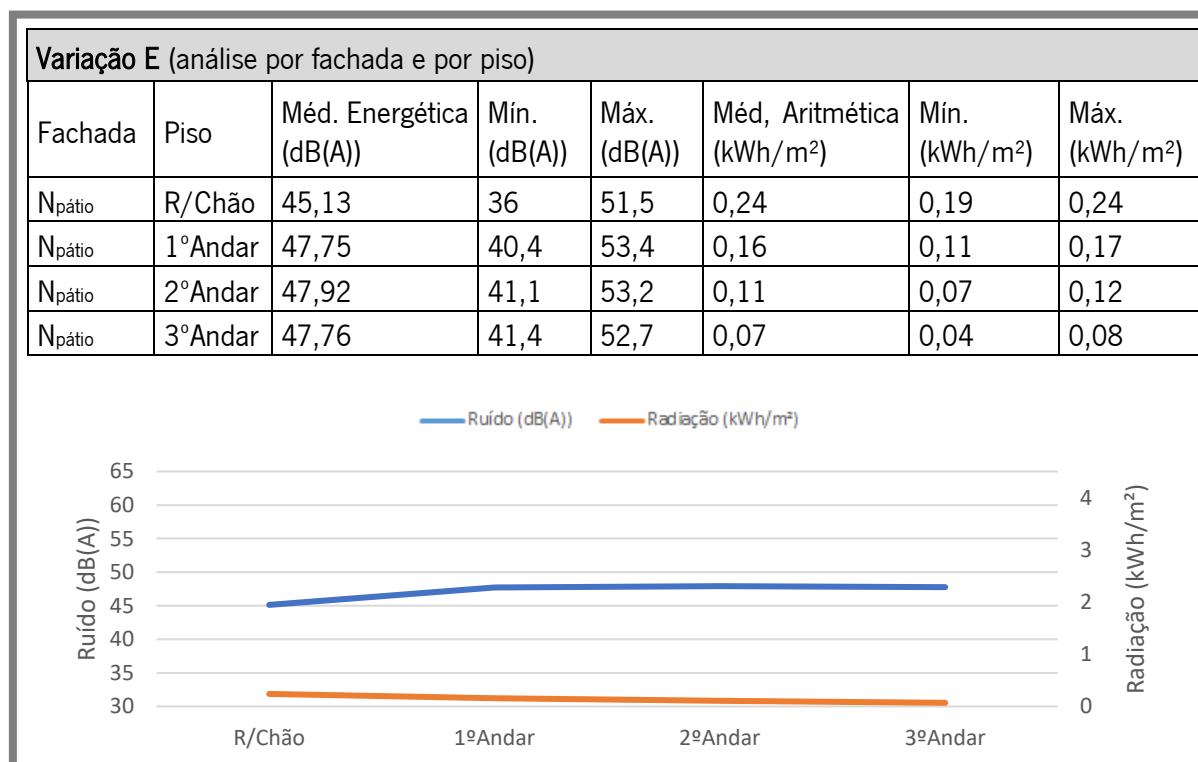


Tabela 118: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)

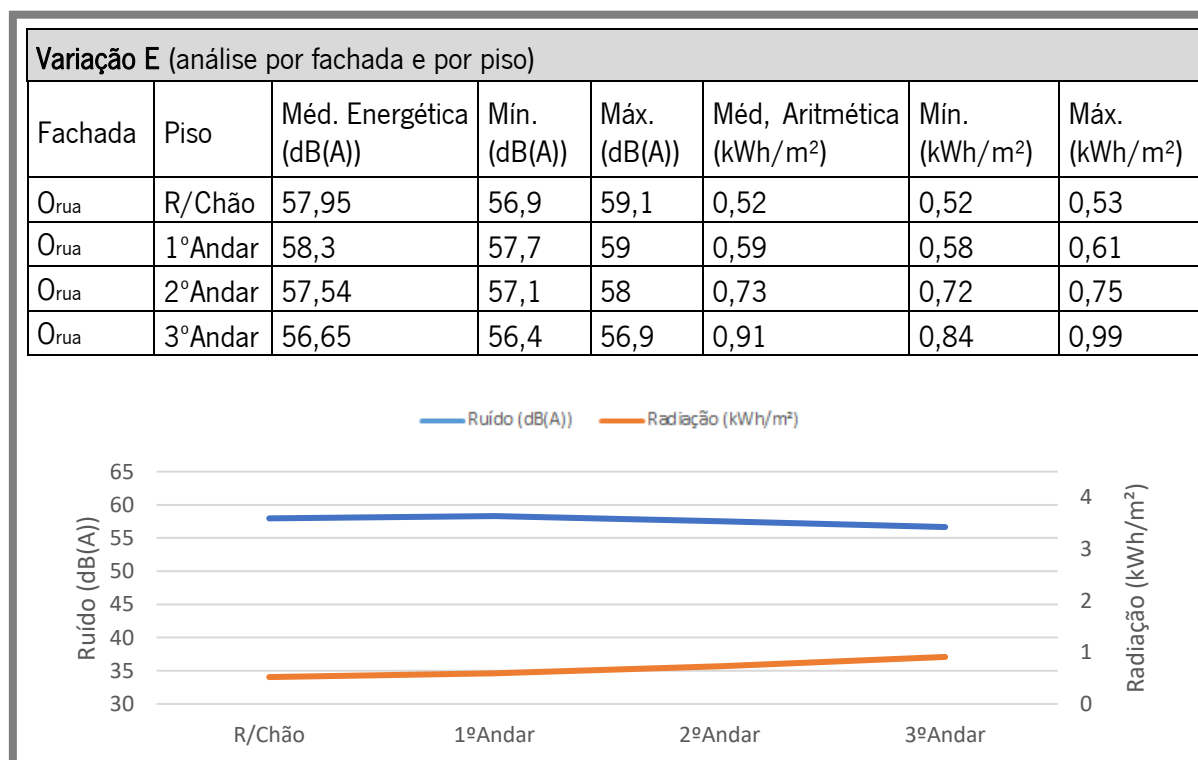


Tabela 119: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)

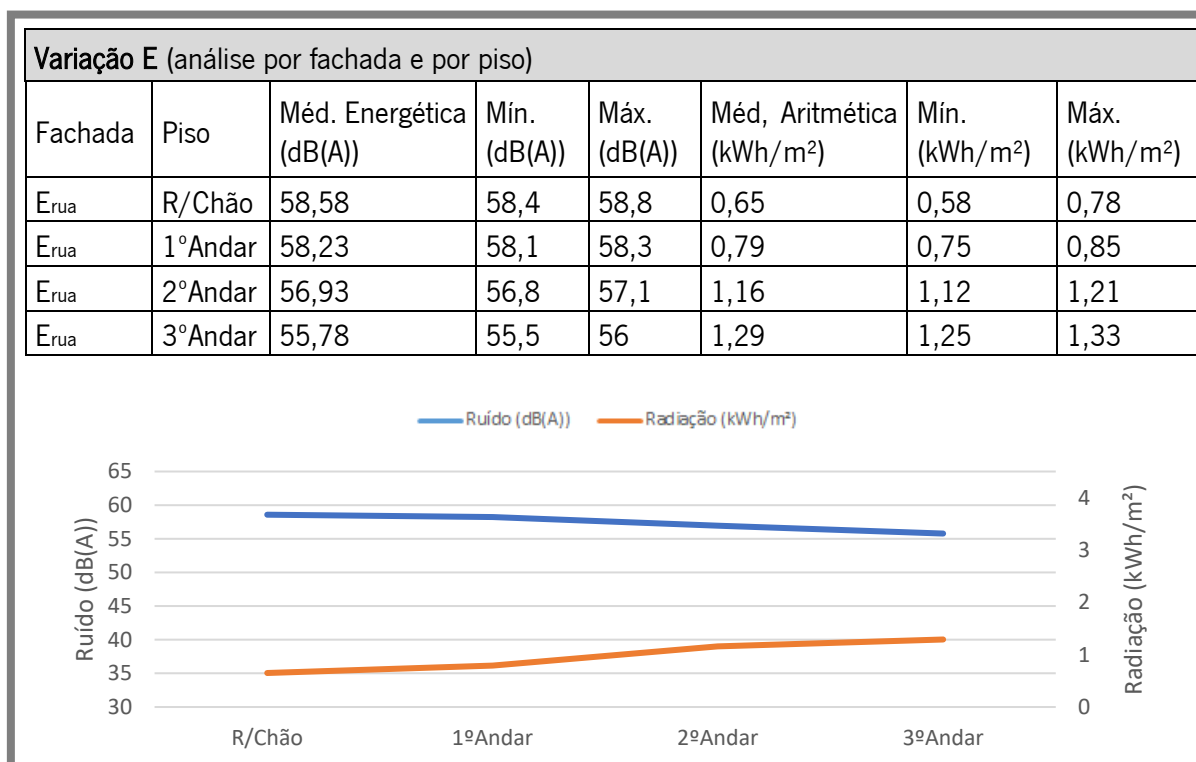


Tabela 120: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Srua)

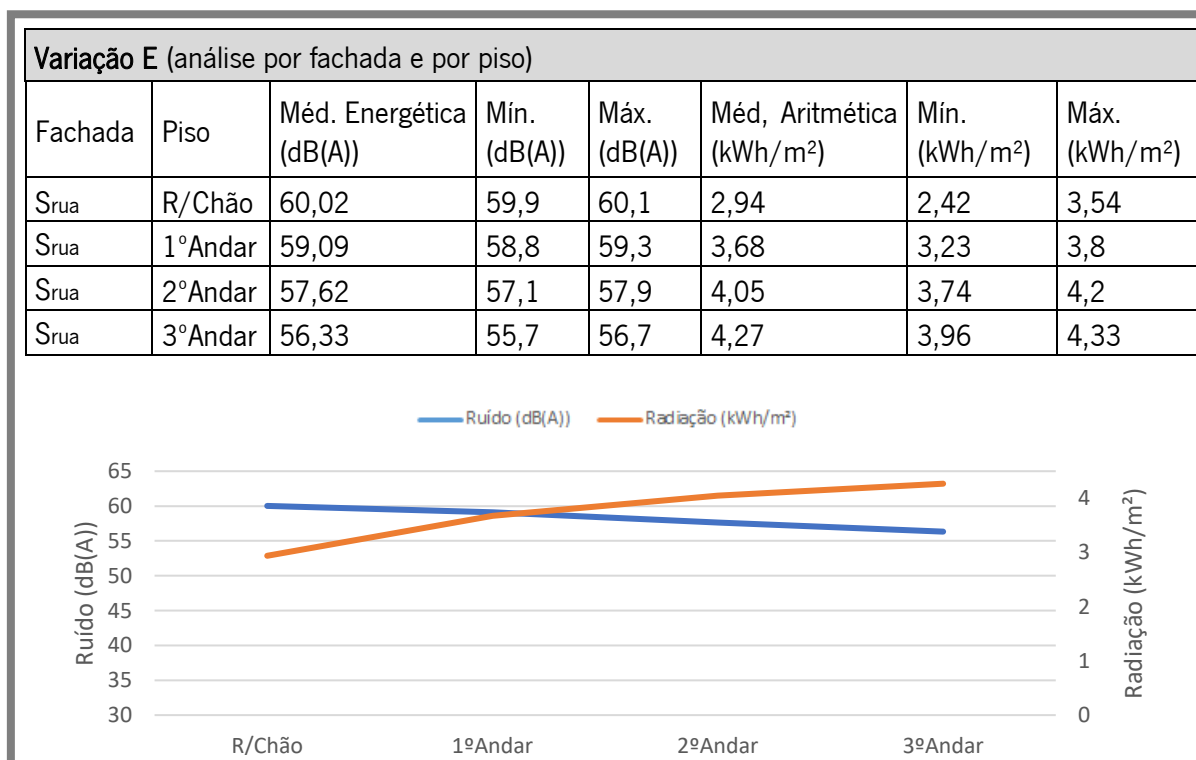


Tabela 121: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Npátio)

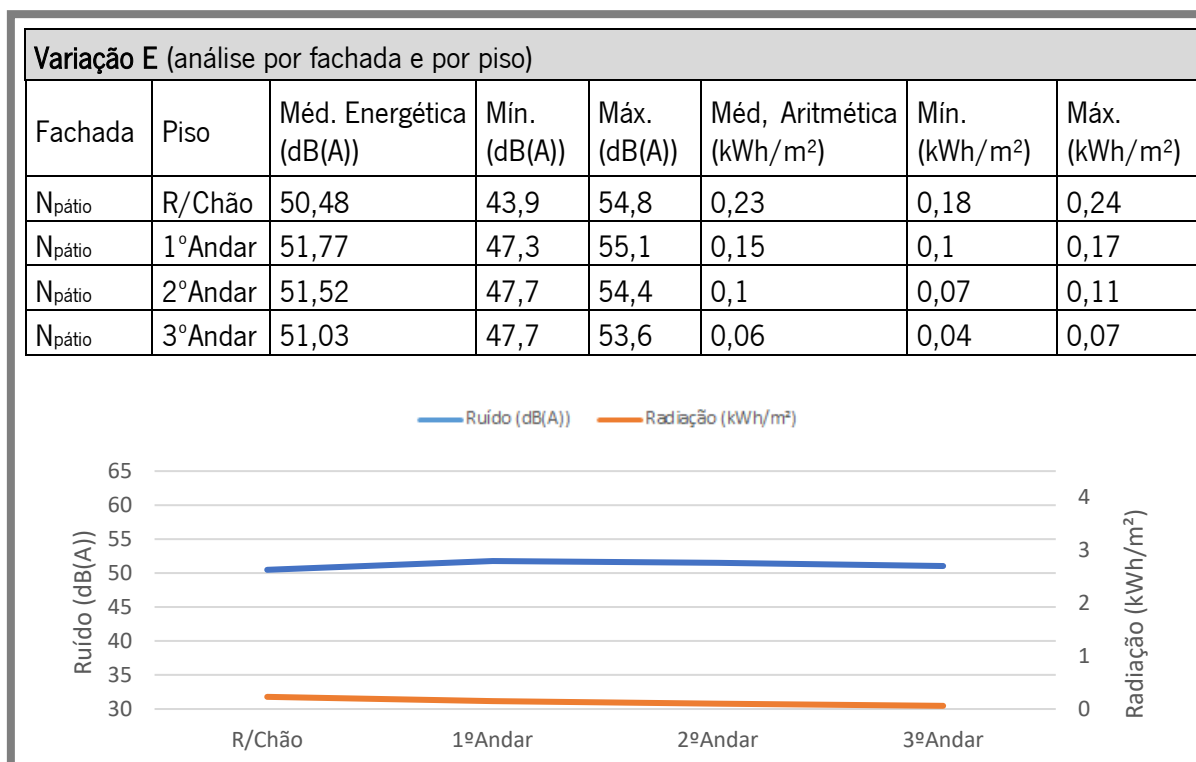


Tabela 122: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Epátio)

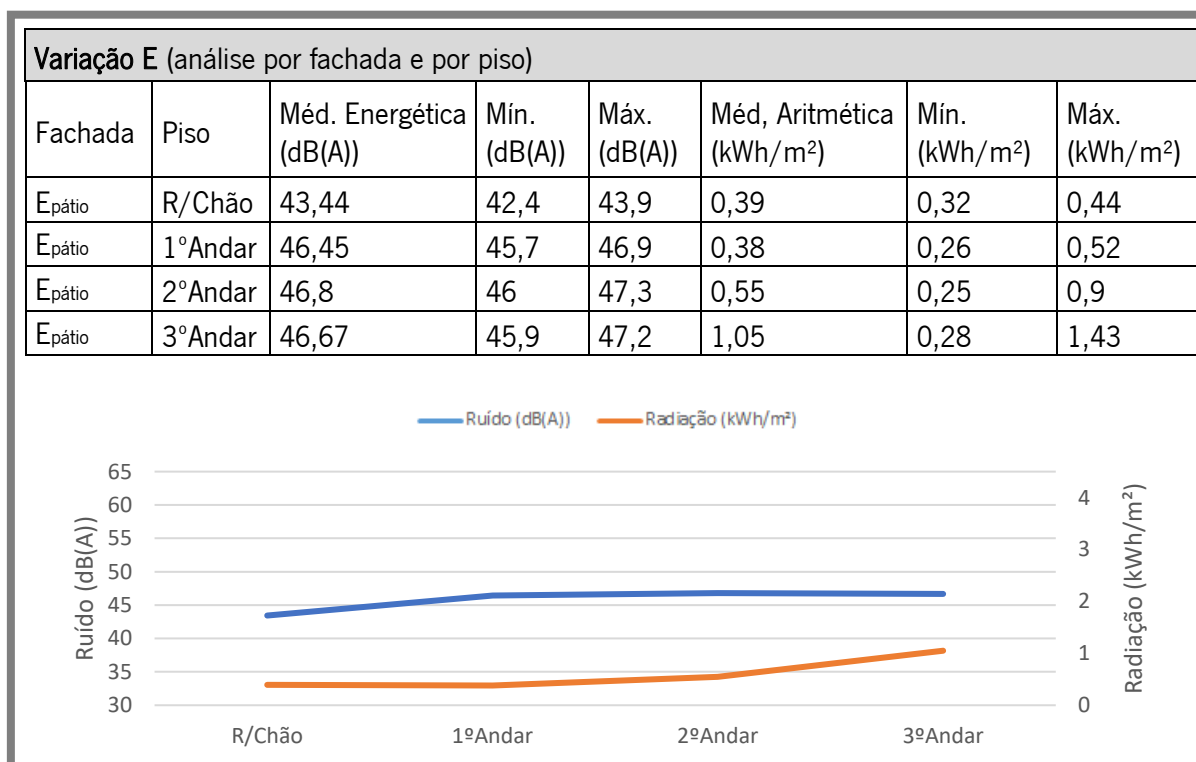


Tabela 123: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Orua)

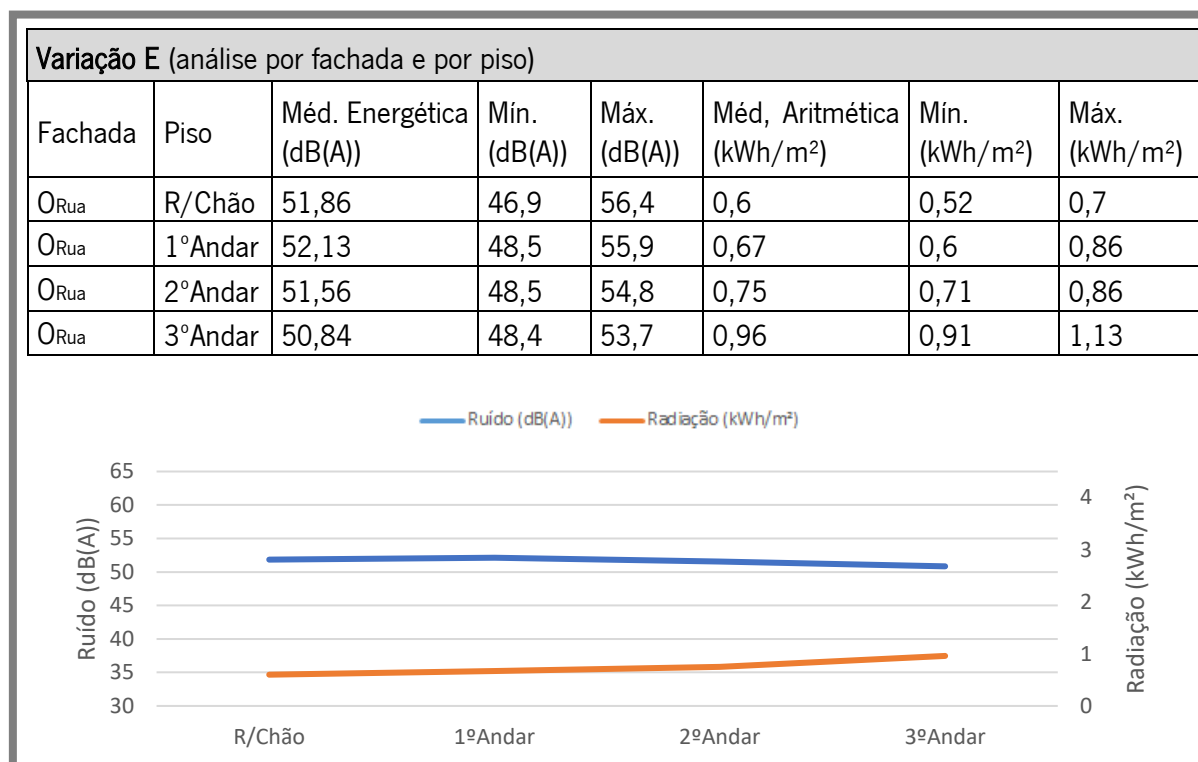


Tabela 124: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Nrua)

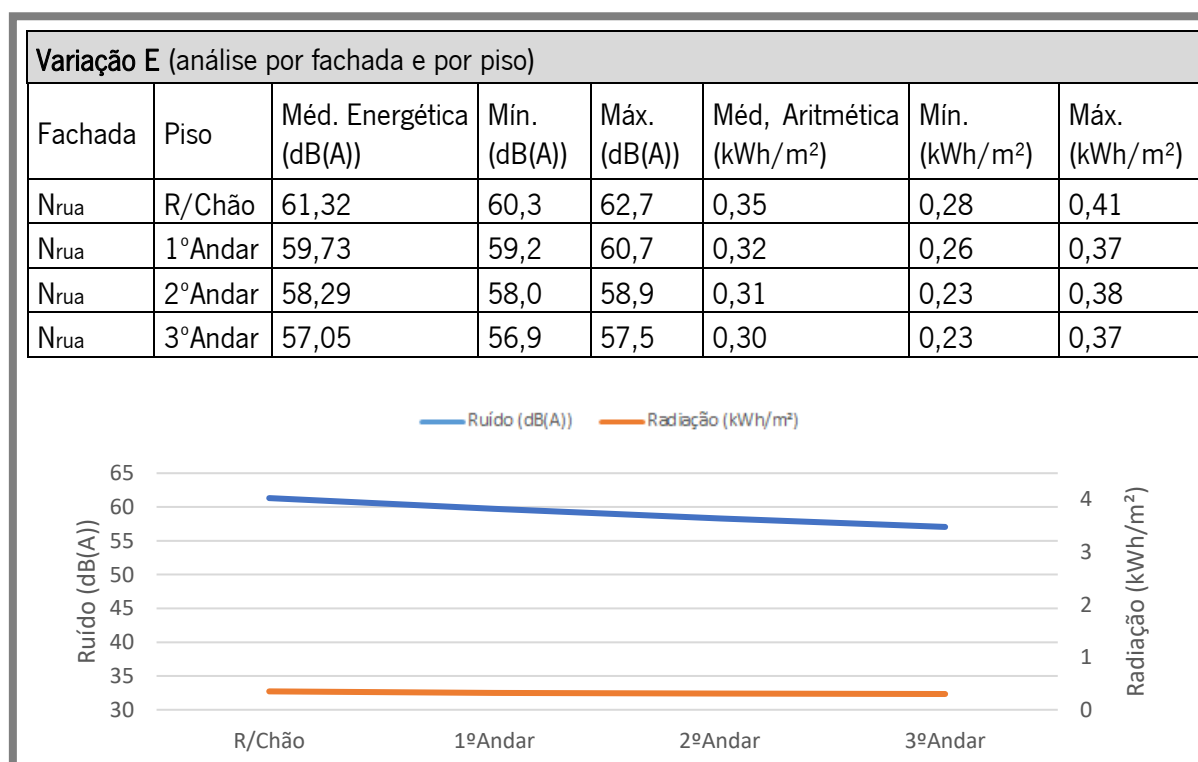


Tabela 125: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Spátio)

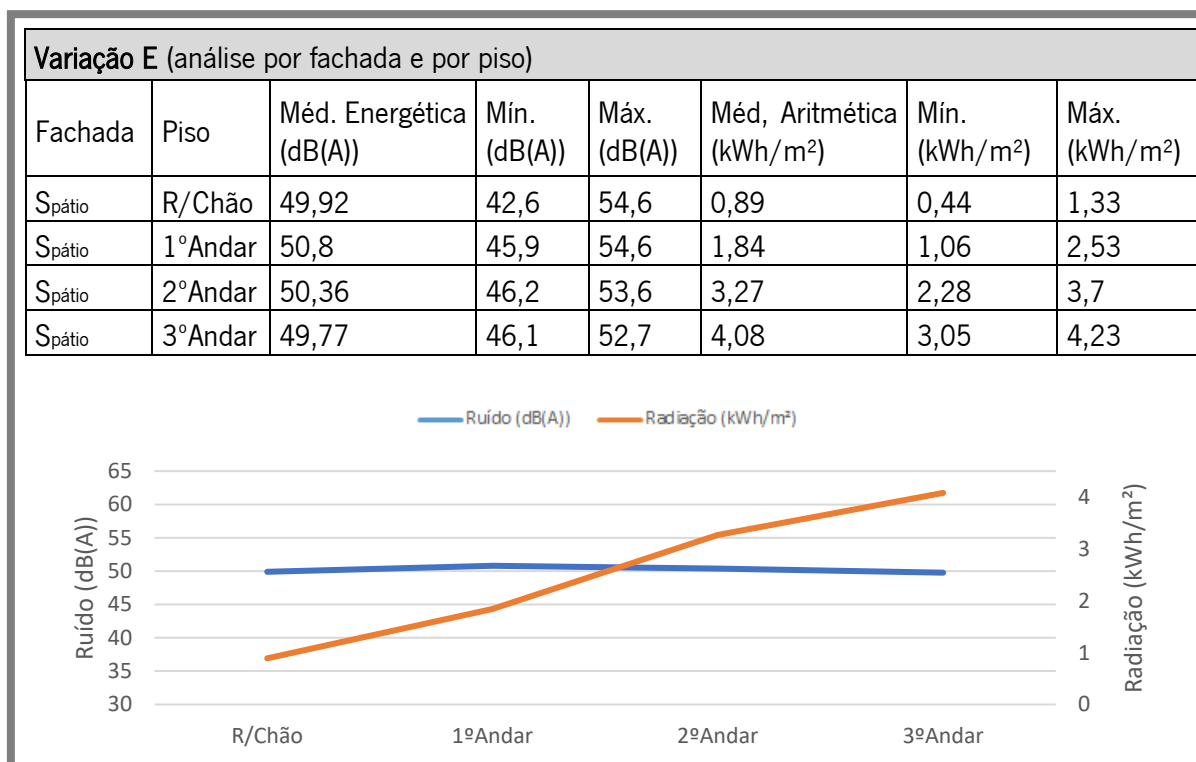


Tabela 126: Variação D (análise por fachada e por piso) (fachada Erua)

