ESTUDO DE SENSIBILIDADE DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO DE EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO MULTIFAMILIAR

Pinto, M.[1*], Viegas, J.[2], Freitas, V. P.[3]

1: Departamento de Engenharia Civil-ESTGV, CONSTRUCT-LFC
Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV), Campus de Repeses, 3504-510 Viseu, Portugal
mpinto@estv.ipv.pt, web: http://www.estgv.ipv.pt/estgv/

2: Núcleo de Acústica, Iluminação, Componentes e Instalações-NAICI
Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal
jviegas@lnec.pt, web: http://www.lnec.pt/edificios/pt/

3: CONSTRUCT-LFC
Faculty of Engineering (FEUP), University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
vpfreita@fe.up.pt, web: http://paginas.fe.up.pt/~construct/

PALAVRAS CHAVE: habitações; sistemas de ventilação; simulação; renovações horárias, humidade relativa

RESUMO

Os sistemas de ventilação assumem uma grande importância no consumo de energia de climatização e na definição das condições higrotérmicas e da qualidade do ar interior dos edifícios. São absolutamente necessários para garantir níveis adequados de renovação do ar interior.
Em Portugal, nos edifícios multifamiliares, recorre-se essencialmente a sistemas de ventilação natural, de exaustão mecânica ou mistos. No entanto, dificilmente se consegue aquilatar convenientemente qual a correspondência entre o sistema de ventilação instalado e a taxa de ventilação atingida com o mesmo. Neste artigo, através de simulação recorrendo ao software CONTAM e com base em dados experimentais da permeabilidade ao ar dos dispositivos de ventilação, realiza-se uma análise de sensibilidade variando alguns dos parâmetros mais significativos nos sistemas de ventilação, tais como: perda de carga das grelhas de admissão, permeabilidade ao ar da caixilharia e caudais de extração na cozinha. A simulação anual dos fluxos de ar recorre a condições ambientais representativas do clima continental português (quatro cidades) e a subdivisão para as estações de aquecimento e arrefecimento, envolve também a produção de poluentes internos (CO_2 e vapor de água). Com a simulação, obteve-se, nomeadamente, para um apartamento tipo, as taxas de ventilação, os fluxos de ar de admissão e exaustão, os teores dos poluentes, pontualmente ou em termos médios.
As conclusões mais significativas a retirar das simulações são: a baixa permeabilidade ao ar da envolvente leva a reduções nas renovações horárias próximas do limite mínimo estabelecido regulamentarmente; a ventilação mecânica contínua na cozinha, a existência de uma grelha de admissão na cozinha, com abertura aquando dos caudais máximos, e o fecho das portas dos compartimentos de serviços reduz significativamente os teores de poluentes.

1. INTRODUÇÃO

A ventilação assume uma grande importância na definição das condições higrotérmicas de conforto e na qualidade do ar interior dos edifícios. É absolutamente necessária para a remoção dos poluentes e da humidade produzida pela utilização dos edifícios e para garantir os níveis de oxigénio necessários ao metabolismo humano e ao funcionamento dos aparelhos de combustão.
Os sistemas de ventilação assumem uma grande importância no consumo de energia de climatização. Deste modo, numa perspetiva meramente energética, poderemos ser erradamente conduzidos para um número de renovações horárias muito baixo. Neste sentido, para otimizar a eficiência energética, é

necessário efetuar uma avaliação da permeabilidade ao ar dos edifícios e identificar os componentes com maior preponderância nessa permeabilidade. Estes dados são necessários para, nomeadamente, conceber tendências de melhoria da envolvente (ex.: janelas e caixas de estore) e realizar simulações com dados fiáveis.

No essencial, existem dois tipos de sistemas: os sistemas com ventilação natural e os sistemas com ventilação mecânica. No entanto, tendo como objetivo potenciar as vantagens destes dois sistemas, têm sido recentemente desenvolvidos sistemas híbridos, ainda numa fase embrionária, que recorrem a dispositivos "inteligentes" de modo a permutar entre os dois modos de funcionamento (natural e mecânico).

Os sistemas de ventilação natural continuam a ser predominantes, principalmente em moradias unifamiliares, em países como a Itália, Reino Unido e Estados Unidos.

Os sistemas de ventilação mecânica permitem um melhor controlo das taxas de ventilação, comparativamente aos sistemas de ventilação natural. Contudo, além de outras desvantagens, é necessária energia para o funcionamento dos ventiladores, emitem ruído e exigem manutenção. Os sistemas de ventilação mecânica são predominantes nos países com clima frio, como a França, Canadá, Holanda e Suécia, tanto em moradias unifamiliares como em edifícios multifamiliares.

Frequentemente, em Portugal, os sistemas de ventilação natural e mecânica encontram-se associados, recorrendo à exaustão mecânica individual na cozinha e exaustão natural nas instalações sanitárias. A exaustão mecânica é descontínua, sendo ativada em função das necessidades dos utilizadores.

2. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO E DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO SIMULADO

Selecionou-se um edifício multifamiliar de 4 pisos e 8 apartamentos (tipologias T3 do lado esquerdo e T2 do lado direito), localizado na periferia da cidade do Porto. O sistema de ventilação natural proposto pelo projetista apresentava as seguintes características (Figura 1) [1]:

- admissão de ar por grelhas autorreguláveis sob a caixa de estore a uma altura aproximada de 2 m; uma grelha por quarto e duas grelhas na sala de "módulo" 30 - caudal de referência (m^3/h) sob a diferença de pressão de 20 Pa;
- admissão de ar por grelha fixa na porta exterior da cozinha, confinante com varanda, instalada na zona inferior da porta;
- exaustão da instalação sanitária com conduta de PVC de ϕ110 (rugosidade absoluta, ε = 0,005 mm) e grelha fixa "corrente" plástica posicionada a aproximadamente 2,1 m do pavimento (coeficiente de perda de carga, ζ = 2,8);
- exaustão do fogão por conduta individual metálica de ϕ150 (ε = 0,15 mm), situada a 1,95 m do pavimento (sem grelha, ζ = 0,5);
- exaustão do esquentador, situado junto à janela da cozinha, por conduta metálica coletiva de ϕ175 (ε = 0,15 mm), situada a 2,25 m do pavimento (sem grelha, ζ = 2,8);
- saídas de evacuação de ar a aproximadamente 1,0 m acima do nível da cobertura em terraço (ζ = 1,25); a conduta da instalação sanitária contém um ventilador estático (ζ = 1,5).

Os elementos que não fazendo parte diretamente do sistema de ventilação, mas que, no entanto, o influenciam, apresentavam as seguintes características:

- porta principal em madeira maciça com vedantes de borracha nas folgas laterais e superior e soleira rebaixada 1 cm para o interior;
- caixa de estore em poliestireno expandido (EPS) com tampa horizontal em aglomerado de madeira nos quartos e sala;
- janelas de correr (vidro simples) com 2 folhas e permeabilidade ao ar da classe 2, de acordo com a EN 12207: 1999.

O apartamento selecionado é do tipo T2, situa-se no 2.º piso do edifício e tem um volume de 161,68 m^3, ver Figura 1.

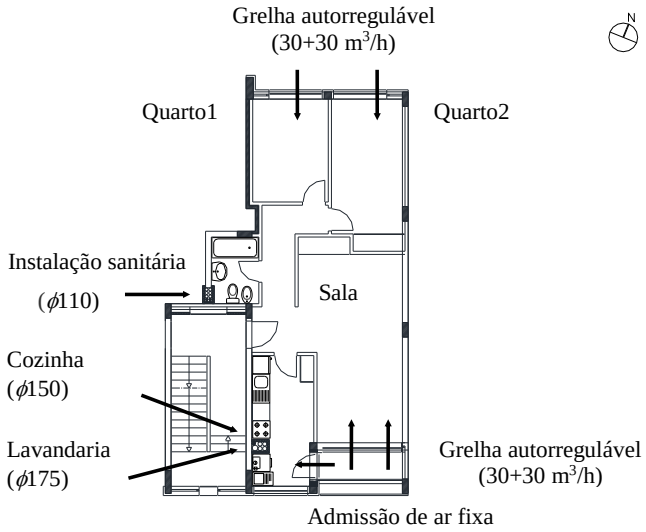

Figura 1: Apartamento do tipo T2 (1.º andar) - sistema de ventilação

As dimensões e permeabilidade das janelas e portas bem como a permeabilidade das grelhas autorreguláveis encontram-se apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Dimensões e permeabilidade das grelhas, portas, caixas de estores e janelas [1]

Componente	Dimensões	Permeabilidade
Janela dos quartos	$1{,}8(l) \times 1{,}0(h)$ m²	$q = 0{,}854\Delta p^{0{,}5801}$ m³/h.m²
Janela da sala	$2{,}7(l) \times 2(h)$ m²	$q = 0{,}547\Delta p^{0{,}4971}$ m³/h.m²
Janela da cozinha	$1{,}8(l) \times 1{,}1(h)$ m²	$q = 0{,}748\Delta p^{0{,}6454}$ m³/h.m²
Caixas de estores	$6{,}3(l)$ m	$q = 12{,}876\Delta p^{0{,}5127}$ m³/h.m
Porta exterior da cozinha	$0{,}8(l) \times 2{,}0(h)$ m²	$q = 3{,}405\Delta p^{0{,}7314}$ m³/h.m²
Porta do apartamento	$0{,}9(l) \times 1{,}8(h)$ m²	$q = 20{,}128\Delta p^{0{,}5402}$ m³/h.m²
Grelha de admissão autorregulável de 30 m³/h		$q = -f30[1 - e^{(-\Delta p/(f\Delta p0))}]$ m³/h $\Delta p_0 = 0{,}8$ Pa ou 10 Pa; $f = 1$
Grelha de admissão da cozinha	$55(l) \times 16{,}5(h)$ cm²	$q = 653{,}576\Delta p^{0{,}5126}$ m³/h.m²
Nota: l: largura; h: altura.		

Os coeficientes de pressão, apresentados na Tabela 2, foram obtidos experimentalmente [2] e, na situação das saídas em cobertura a 1 m acima da cobertura em terraço, foram corrigidos de acordo com a EN 15242: 2007.

Tabela 2: Coeficientes de pressão

	Direção do vento											
Local	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Fachada principal-150º	0,36	0,47	-0,01	-0,31	-0,58	-0,47	-0,55	-0,49	-0,25	0,01	0,34	0,29
Fachada tardoz-330º	0,61	0,34	0,01	-0,08	-0,07	-0,09	-0,08	-0,06	-0,05	-0,02	0,40	0,53
Cobertura a meio	-0,69	0	-0,26	-0,59	-0,87	-0,87	-0,33	-0,35	-0,33	-0,83	-0,76	-0,79
Cobertura à frente	-0,55	-0,06	-0,32	-1,00	-0,87	-0,89	-0,35	-0,40	-0,39	-0,83	-0,71	-0,72

3. MODELO COMPUTACIONAL E RESPETIVA VALIDAÇÃO

As condições e simplificações adotadas no modelo são as seguintes:

- conduta individual do esquentador em vez de coletiva (a variação da perda de carga na admissão revelou que esta simplificação não teve impacto significativo nos resultados das renovações horárias);

- desprezou-se outras componentes menos relevantes da permeabilidade da envolvente (ex.: tubagem de eletricidade);
- caixa de escadas com 2 grelhas de ventilação, na parte inferior e superior ($q = 653{,}576\Delta p^{0{,}5126}$ [m³/h]);
- apartamentos adjacentes com dispositivos de ventilação com permeabilidades idênticas às do apartamento estudado.

A análise comparativa para a validação do modelo encontra-se apresentada na Tabela 3.

Tabela 3: Validação do modelo [1], [3]

	Método de ensaio - variável obtida				
	PFT - *Rph*			Decaimento - *Rph*	Porta ventiladora- n_{50}
	2 a 9 de agosto	12 a 19 de jan.	26 jan. a 2 de fev.	30 de jan.: 1h10	
$T_{\text{média interior}}$ [ºC]	24,2	11,2	16,8	17,0	
$T_{\text{média exterior}}$ [ºC]	25,4	8,8	5,9	12,1	
Vento-velocidade média [m/s]	1,9	1,4	1,7	1,5	
Vento-direção predominante	SE+NW = 34%	S+SE = 51%	N+SE = 36%	N+NE = 52%	
R_{ph} ou n_{50} experimental [h^{-1}]	0,51	0,57	0,69	0,62	$6{,}0_{\text{pressão}}$; $6{,}3_{\text{depressão}}$
R_{ph} ou n_{50} simulado [h^{-1}]	0,59	0,58	1,00	0,67	$5{,}8_{\text{pressão}}$; $5{,}8_{\text{depressão}}$
Diferença exp. - simulado [%]	14	2	31	7	5 9

Um dos fatores que poderá estar na origem das diferenças simulação-experimental é a adoção da permeabilidade dos componentes somente em depressão (entrada de ar).

Em face das reduzidas discrepâncias entre os valores simulados e ensaiados (excetuando o ensaio de 26 a 2 de fev) pode considerar-se que o modelo apresenta fiabilidade em relação à realidade.

4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Através de simulação recorrendo ao software CONTAM [4] e com base em dados experimentais da permeabilidade ao ar dos dispositivos de ventilação, realizou-se uma análise de sensibilidade variando alguns dos parâmetros mais significativos nos sistemas de ventilação, tais como: perda de carga das grelhas de admissão, permeabilidade ao ar da caixilharia e caudais de extração na cozinha.

A simulação anual dos fluxos de ar recorre a condições ambientais representativas do clima continental português (quatro cidades) e à subdivisão para as estações de aquecimento e arrefecimento, envolve também a produção de poluentes internos (vapor de água e CO_2).

As condições e simplificações adotadas nas simulações foram as seguintes:

- emissão de poluentes pelos ocupantes e atividades conforme Tabelas 4 e 5; as crianças foram consideradas no quarto 2, ambas com menos de 14 anos;
- temperatura interior constante e homogénea (modelo monozona) ao longo das estações de aquecimento ou arrefecimento, conforme Tabela 6;
- revestimentos sem higroscopicidade;
- quando requerido, portas interiores fechadas com folga inferior de 8 mm de altura;
- ficheiros climáticos do *Energyplus* para as quatro cidades selecionadas;
- vãos com permeabilidade melhorada de acordo com a classe 4 da EN 12207: 1999; permeabilidade da porta de patamar de acordo com a prNP 1037-1: 2015;
- caudais de admissão e exaustão de acordo com a normalização portuguesa (prNP 1037-1: 2015 e NP 1037-2: 2009);
- interação do apartamento estudado com o edifício somente através da caixa de escadas.

Tabela 4: Emissão de poluentes pelos ocupantes [5], [6]

Ocupantes		CO_2 [l/h]	H_2O [g/h]
Adultos	Acordado: 6h30 - 7h45; 19h00 - 24h	20,3	55
	A dormir: 24h00 - 6h30	13,5	30
Crianças até 14 anos	Acordado: 6h50 - 7h45; 19h00 - 22h30	17,3	45
	A dormir: 22h30 - 6h50	11,3	25

Tabela 5: Emissão de poluentes pelas atividades [7], [8]

Atividades	H_2O [g/h.familia]	CO_2 [l/h.familia]
Cozinhar a gás: - Peq. almoço (7h00 - 7h30); - Jantar (20h00 - 21h00).	 1000 2500	180
Lavagem manual de loiça: peq. almoço (7h15 - 7h30)	800	
Duche: 6h40 - 7h20	1200	
Secagem de roupa após centrifugação: 8 kg; 12h, no fim de semana	250	

Tabela 6: Temperatura interior adotada [9]

Cidade	$T_{50\%\ aquecimento}$ (outubro - maio)	$T_{50\%\ arrefecimento}$ (junho - setembro)
	[ºC]	[ºC]
Bragança	17,5	24,0
Porto	19,5	24,0
Lisboa	20,0	27,0
Faro	22,0	27,5
Nota: as temperaturas apresentadas referem-se a um apartamento do tipo T3, sem aquecimento, com proteção exterior nos vãos e reabilitado. A reabilitação envolveu o sistema de ventilação, a caixilharia e a colocação de isolamento térmico de 8 cm na cobertura.		

Os sistemas de ventilação simulados e as respetivas renovações horárias encontram-se apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Renovações horárias em função dos sistemas de ventilação simulados

			Rph_{aquec}	Rph_{arref}
	Tipo de sistema	Cidade	μ	μ
1	SISTEMA BASE INICIAL	Bragança	0,96	0,85
		Porto	1,24	0,92
		Lisboa	1,07	1,33
		Faro	1,25	0,98
2	PERMEABILIDADE AO AR REDUZIDA (sistema 1, sem estores, com grelhas de admissão autorreguláveis a 2 Pa com caixilharia de classe 4 de permeabilidade ao ar, com porta de patamar de baixa permeabilidade e sem grelha fixa de admissão na cozinha)	Bragança	0,69	0,56
		Porto	0,76	0,61
		Lisboa	0,68	0,75
		Faro	0,76	0,64
3	EXAUSTÃO MECÂNICA CONTÍNUA NA COZINHA (sistema 2, com exaustão mecânica contínua na cozinha com 180 m³/h durante refeições e 60 m³/h fora das refeições)	Bragança	0,74	1,02
		Porto	1,11	1,09
		Lisboa	1,12	1,14
		Faro	1,12	1,10
4	EXAUSTÃO MECÂNICA CONTÍNUA NA COZINHA E GRELHA FIXA AUTOMÁTICA NA COZINHA (sistema 3, com grelha de abertura automática de área 60 cm² durante refeições[1])	Bragança	0,76	0,68
		Porto	0,83	0,73
		Lisboa	0,78	0,86
		Faro	0,84	0,76
5	EXAUSTÃO MECÂNICA CONTÍNUA, GRELHA FIXA AUTOMÁTICA NA COZINHA E PORTAS FECHADAS (sistema 4, com portas cozinha e instalação sanitária fechadas durante uso dos compartimentos)	Bragança	0,74	0,66
		Porto	0,81	0,72
		Lisboa	0,77	0,83
		Faro	0,81	0,73
Nota 1- Grelha fixa de abertura autorregulável de acordo com dispositivo comercial francês (fabricante ALDES).				

Em relação ao sistema 1 (sistema Base), apresenta-se na Figura 2 a frequência da diferença de pressão na grelha do quarto 2 (Bragança - aquecimento). Retira-se da figura que as grelhas correntes, com regulação de caudal para cerca de 20 Pa, são bastante desadequadas pois, neste caso, o diferencial de pressão em 80% do tempo é inferior a 1 Pa, do que resultam caudais de admissão, por esta via, bastante reduzidos (o caudal de projeto - 30 m³/h - nunca é atingido).

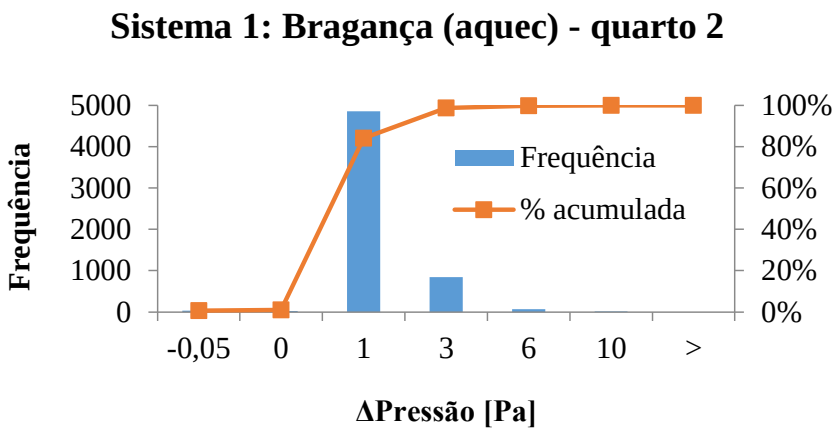

Figura 2: Sistema de ventilação 1, quarto 2 - Pressão na grelha

Em relação ao mesmo sistema, apresenta-se na Figura 3 a frequência da humidade relativa na cozinha (Bragança - aquecimento). Verifica-se que em cerca de 18% do tempo a humidade relativa é superior a 70% (valor limite recomendado em [8]) o que denota um compartimento húmido propício ao desenvolvimento de fungos. Em relação à concentração de CO_2 esta não revela valores preocupantes (somente em 9% do tempo os valores são superiores a 1250 ppm [6]).

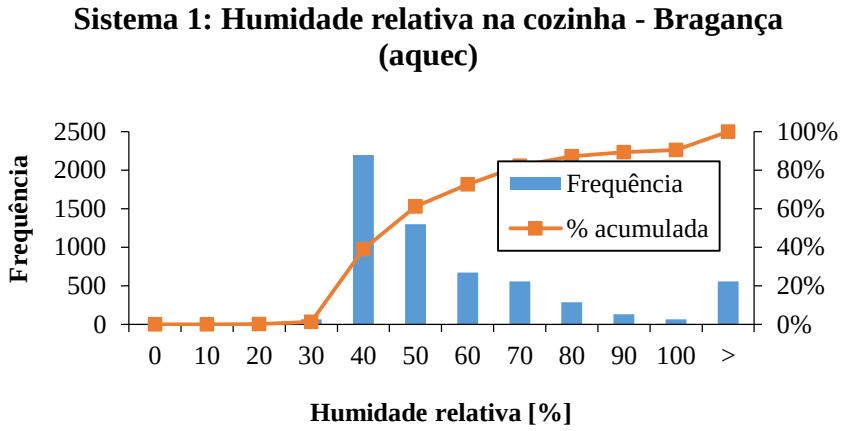

Figura 3: Sistema de ventilação 1, cozinha - Humidade relativa

O sistema 2, com permeabilidade reduzida, apresenta os valores mais baixos das renovações horárias. A título exemplificativo, apresenta-se na Tabela 8 os caudais de admissão para dois dias na cidade de Bragança na estação de arrefecimento. Pode concluir-se que a permeabilidade das janelas contribui com um caudal de admissão muito pequeno para o respetivo compartimento (cerca de 1 a 5%).

Tabela 8: Sistema de ventilação 2 - caudais de admissão para dois dias na cidade de Bragança, estação de arrefecimento

	Caudais: 22 de junho [m³/h]			Caudais: 27 de julho [m³/h]		
	Janela	Grelha(s)	Total	Janela	Grelha(s)	Total
Quarto 1	1,37	28,42	29,79	0,28	21,98	22,26
Quarto 2	1,37	28,42	29,79	0,28	21,94	22,22
Sala	2,57	56,83	59,40	0,67	34,59	35,26
R_{ph} [h^{-1}]	0,74			0,49		

Em relação ao sistema 3, com exaustão mecânica na cozinha, apresenta-se na Figura 4 a frequência dos caudais de admissão no quarto 2 (Bragança - aquecimento). Comparativamente à Figura 2, verifica-se que as grelhas de admissão com regulação de caudal para 2 Pa permitem a admissão do caudal de projeto (30 m³/h) em cerca de 91% do tempo.

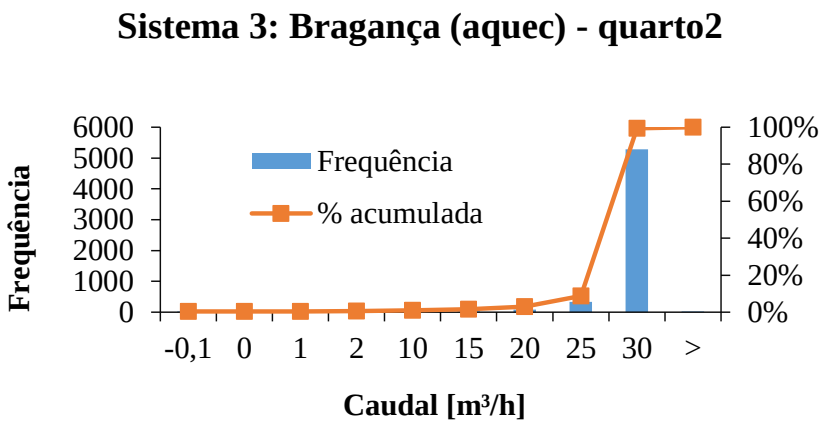

Figura 4: Sistema de ventilação 3, quarto 2 - Caudais de admissão

O sistema 5 (exaustão mecânica na cozinha, grelha fixa na envolvente da cozinha aquando das refeições e fecho das portas da cozinha e instalação sanitária aquando da respetiva utilização) permite menores renovações horárias, comparativamente com o sistema 1, e simultaneamente menores níveis de humidade relativa nos compartimentos (ver Tabela 9). Apresenta-se na Figura 5 a frequência da humidade relativa na cozinha (Bragança - aquecimento). Verifica-se que em cerca de 20% do tempo a humidade relativa é superior a 70% (comparável ao sistema 1).

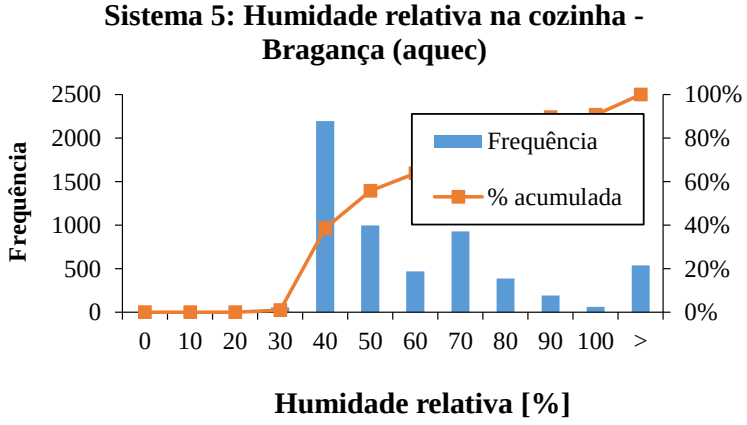

Figura 5: Sistema de ventilação 5, cozinha - Humidade relativa

Em relação aos contaminantes estudados, apresentam-se na Tabela 9, para a cidade de Bragança, a percentagem de tempo em que ultrapassam os valores de referência. Verifica-se que o sistema 5 é especialmente eficaz na redução dos níveis de humidade relativa na instalação sanitária e quarto 1.

Tabela 9: Percentagem de tempo em que os contaminantes ultrapassam os valores de referência

			Compartimento		
Sistema	Cidade (estação)	Contaminante	Cozinha	WC	Quarto1
1	Bragança (aquec)	*HR*[a]	18	25	17
		CO_2[b]	9		
2	Bragança (aquec)	*HR*	28	30	25
		CO_2	10		
3	Bragança (aquec)	*HR*	26	28	23
		CO_2	8		
4	Bragança (aquec)	*HR*	26	27	20
		CO_2	8		
5	Bragança (aquec)	*HR*	20	6	6
		CO_2	8		
Notas: a- Percentagem de tempo superior a 70%; b- Percentagem de tempo superior a 1250 ppm.					

5. CONCLUSÕES

As principais conclusões a retirar das simulações são:

- com exceção de Lisboa, as renovações horárias são genericamente inferiores na estação de arrefecimento provavelmente devido à menor intensidade do vento ou rumos menos favoráveis;
- a redução da permeabilidade ao ar da envolvente, sistema 2, leva a reduções nas renovações horárias próximas do limite mínimo estabelecido regulamentarmente ($\geq 0{,}4\ h^{-1}$ - Portaria 349-B/2013);
- é vantajosa a colocação de uma grelha fixa de admissão na cozinha, com abertura automática aquando do caudal máximo do exaustor (às refeições), pois permite reduzir as renovações horárias (comparação entre os sistemas 3 e 4);
- é vantajoso fechar a porta nos compartimentos de serviço aquando da utilização, reduzindo deste modo os teores de humidade relativa mas prejudicando um pouco as renovações horárias (comparação entre os sistemas 4 e 5);
- uma vez que nos sistemas estudados se recorre à ventilação natural da instalação sanitária e do esquentador (sistema misto) ocorrem pontualmente inversões de fluxo nestas condutas com especial ênfase no sistema 3 (resultados não apresentados).

6. BIBLIOGRAFIA

[1] Pinto M., Viegas J., Freitas V. Air Permeability Measurements of Dwellings and Building Components in Portugal. Building and Environment, vol. 46, 2011.

[2] Silva, F., Caracterização da Distribuição de Pressões na Envolvente de um Conjunto de Edifícios Situados em Gondomar, Nota Técnica 1/2007-NOE-A, LNEC, 2007.

[3] Pinto, M. *et al*, Measurements of Air Change Rates using the PFT Technique in Residential Buildings in Northern Portugal, 27th AIVC Conference, Lyon, França, 2006.

[4] Dols, W.; Polidoro, B., CONTAM User Guide and Program Documentation - Version 3.2, NIST Technical Note 1887, USA, 2015.

[5] Dorer, V.; Pfeiffer, A.; Weber, A., Parameters for the Design of Demand Controlled Hybrid Ventilation Systems for Residential Buildings, Technical Note 59, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 2005.

[6] Portaria 353-A/2013, Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) - Requisitos de Ventilação e Qualidade do ar Interior, 4 de dezembro de 2013.

[7] BSI, Code of Practice for Design of Buildings. Ventilation Principles and Designing for Natural Ventilation, BS 5925, British Standards Institution, London, 1991.

[8] CEN, Ventilation for Buildings. Design and Dimensioning of Residential Ventilation Systems, CEN/TR 14788, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2006.

[9] Curado, A., Conforto Térmico e Eficiência Energética nos Edifícios de Habitação Social Reabilitados, Tese de doutoramento submetida à FEUP, 2014.