

FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE LISBOA

# Estratégias de Ventilação Natural no Ambiente Construído

Guilherme Carrilho da Graça

Prof. Ass. Ag. FCUL

Lic. Eng. Física (IST), MSc (MIT), PhD (UCSD), Esp. Climatização (OE).

5 de Maio de 2026

# Introdução

- Na primeira década deste século, **a população urbana ultrapassou a população não urbana** pela primeira vez na história.
- Existem três tipos principais de edifícios com diferentes necessidades: **residencial, de serviços e industrial.**
- Estes edifícios têm diferentes requisitos de ambiente interior (normalmente mais baixos em edifícios industriais) e consumo de energia (mais alto em edifícios de serviços).
- Neste contexto torna-se importante perceber porque é que construímos e como construímos.

## Introdução: Por que é que construímos?



# Introdução: Por que é que construímos?

RESPOSTA: **construímos para modificar o ambiente exterior.**

Criamos **ambientes modificados** que são adequados para as atividades realizadas no seu interior.

**Essa modificação ocorre em várias áreas** que afetam nosso conforto e segurança:

- Qualidade do ar
- Temperatura e humidade
- Luz
- Som



## Introdução: como é que construímos?

Todos nós ouvimos falar de **projetos de construção que ultrapassam o orçamento** e os prazos

Aproximadamente **90% dos projetos de infraestruturas e edifícios** que estão atualmente em execução no mundo estão **atrasados, acima do orçamento** inicial (ou as duas coisas!).

O aeroporto de Berlin Brandenburg deveria ser inaugurado em 2012 com um custo total projetado de **2.800 milhões de euros**.

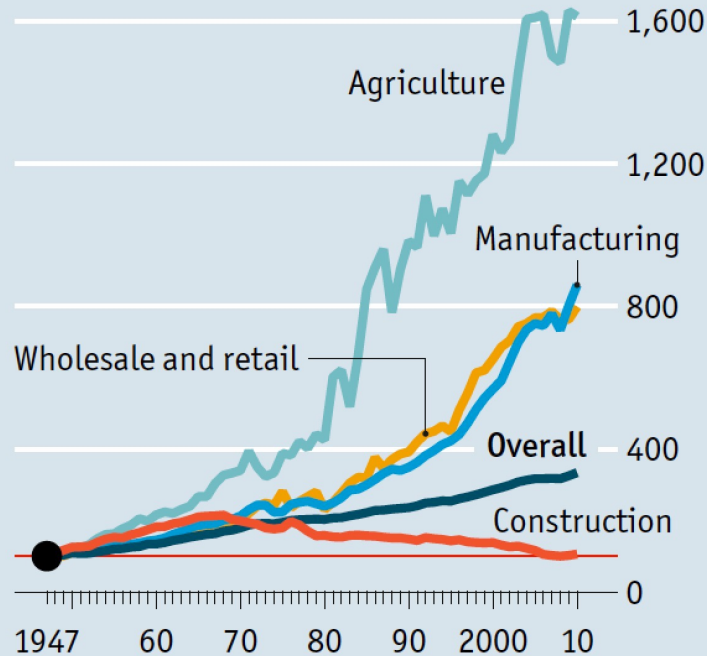
Em 2016 o porta-voz do projeto disse que se tratava de um “sh! T-show”, tendo acrescentado: nenhum gestor que não seja “viciado em comprimidos” pode garantir uma data de inauguração.

Este porta-voz foi despedido em 2016 e o aeroporto finalmente foi inaugurado em outubro de 2020. O custo final é de mais de **6500 milhões de euros**.

# Introdução: como é que construímos?

## Unlearning by doing

United States, gross value-added\*  
Per hour worked, 1947=100



Com eficiência muito baixa ... devido a:

- **Personalização excessiva** (muitos edifícios feitos à medida)
- **Cada edifício é um protótipo (!)**
- Pouca experiência na equipa de projeto
- Precisamos de **mais pré-fabricação e maior standardização.**

Temos também este grande problema (P1):

As alterações climáticas devem-se à utilização de **combustíveis fósseis, qual a contribuição dos edifícios?**

Fonte: The construction industry, Least improved, The Economist (19/8/2017)

**P1:** As alterações climáticas devem-se à utilização de combustíveis fósseis  
Qual a contribuição dos edifícios?

### Buildings Emissions Scopes

Scope	Includes	Typical data source	Typical value
<b>A. Operational CO<sub>2</sub> only</b>	Direct & indirect emissions from building operation (heating, cooling, lighting, appliances)	IEA “Buildings” or UNEP GlobalABC	~9 Gt CO <sub>2</sub> (2022)
<b>B. Operational + embodied CO<sub>2</sub></b>	A + emissions from producing building materials (cement, steel, glass, etc.) and construction processes	UNEP GlobalABC “Buildings & Construction”	~12 Gt CO <sub>2</sub> (2022–2024)
<b>C. All GHGs (CO<sub>2</sub>e)</b>	B + methane, N <sub>2</sub> O, F-gases from refrigerants	EDGAR / UNEP / IEA combined	~13–14 Gt CO <sub>2</sub> e (≈ 25–30 % of global total)

Global total type	Value (2024 est.)	Building share to use	Resulting “buildings” figure
CO <sub>2</sub> only (fossil + cement)	37–38 Gt CO <sub>2</sub>	32–34 %	≈ 12–13 Gt CO <sub>2</sub>
All GHGs (CO <sub>2</sub> e)	52–54 Gt CO <sub>2</sub> e	25–27 %	≈ 13–14 Gt CO <sub>2</sub> e

### Remaining Carbon Budget (from 2025)

Warming limit	Chance of staying below	Remaining CO <sub>2</sub> budget (Gt)
1.5 °C	50 %	130 Gt CO <sub>2</sub>
1.5 °C	67 %	80 Gt CO <sub>2</sub>
1.5 °C	33 %	200 Gt CO <sub>2</sub>
1.7 °C	67 %	390 Gt CO <sub>2</sub>
2.0 °C	67 %	870 Gt CO <sub>2</sub>
2.0 °C	50 %	1050 Gt CO <sub>2</sub>

Sources: UNEP Global Status Report for Buildings and Construction 2024; IEA Buildings 2024; EDGAR v8.0; Indicators of Global Climate Change 2025 (Earth System Science Data).

# R1: Precisamos de reduzir as emissões de todos os setores

Os edifícios representam 30% do problema, os arquitetos têm de resolver o problema!?

Sozinhos não! É bem difícil !

Esta ideia do “nothing” resulta da enorme dificuldade da tarefa. É muito difícil reduzir o impacto e inovar de forma consequente nesta área.

No entanto há quem ache que vai ser possível, que vamos fazer “carbon-neutral buildings”.

Vamos começar por responder a algumas perguntas e depois vamos olhar para os “carbon-neutral buildings”.

## Jacques Herzog: letter to David Chipperfield

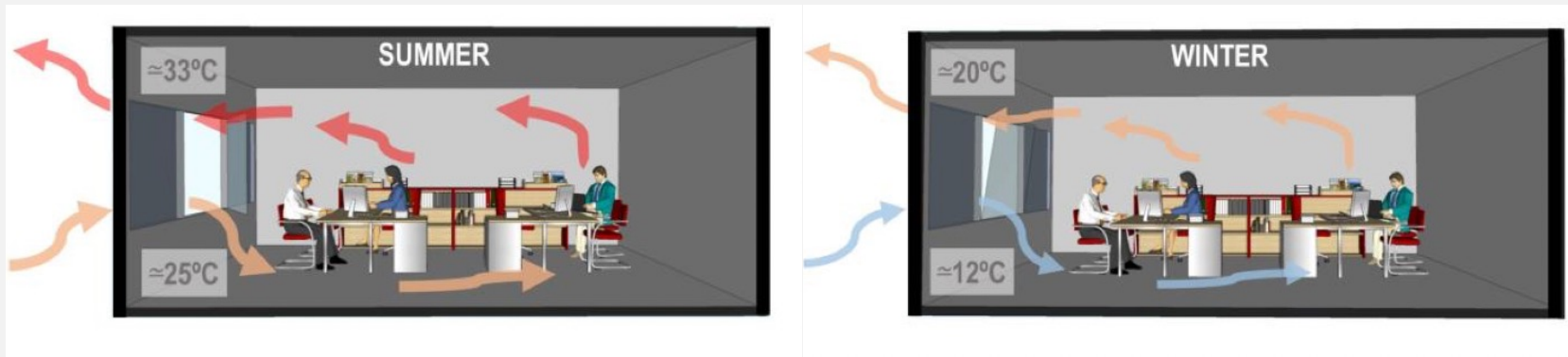
The guest editor 2020 receives a letter from his illustrious colleague, who writes to him about the difficulty for architects to actively act on environmental disasters.

Dear David,  
You ask me what we architects should do about the unmistakably impending environmental catastrophe. About social inequality. About poverty. About the degradation of this planet’s resources. About the pandemic, which has placed us in an almost surreal mode that begs description. All of which is being managed by political leaders, whose cynicism and absurd actions put the Marx Brothers to shame.

**Dear David, the answer is: nothing.**

## P2: Porque é que o principal desafio nos edifícios de serviços é o arrefecimento e não o aquecimento?

Melhorias contínuas no isolamento térmico da envolvente dos edifícios, combinadas com um aumento nos ganhos térmicos internos garantem aquecimento suficiente no inverno e criam a necessidade de arrefecimento no resto do ano.



**P3:** Sabendo que a ventilação natural (VN) funcionou bem durante vários séculos: porque é que a maioria dos edifícios de escritórios modernos precisam de ar condicionado?

Os escritórios do início do século XX tinham **pouca profundidade ou teto alto**.

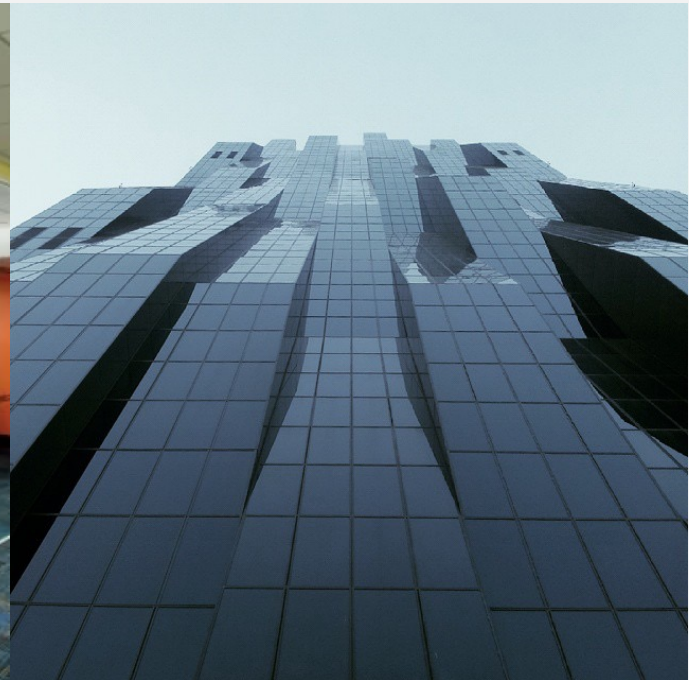
Estas configurações eram boas para VN devido à proximidade de uma janela ou à existência de uma camada de ar superior que permite acumular e exaurir os poluentes internos.



**P3:** Sabendo que a ventilação natural (VN) funcionou bem durante vários séculos: porque é que a maioria dos edifícios de escritórios modernos precisam de ar condicionado?

RESPOSTA: os escritórios modernos **são um ambiente hostil para a VN.**

A VN não consegue garantir **conforto térmico em espaços muito profundos**, com elevados ganhos internos. Em muitos casos temos ainda uma **fachada tipo coletor solar totalmente envidraçada.**



**P3:** Sabendo que a ventilação natural (VN) funcionou bem durante vários séculos: porque é que a maioria dos edifícios de escritórios modernos precisam de ar condicionado?

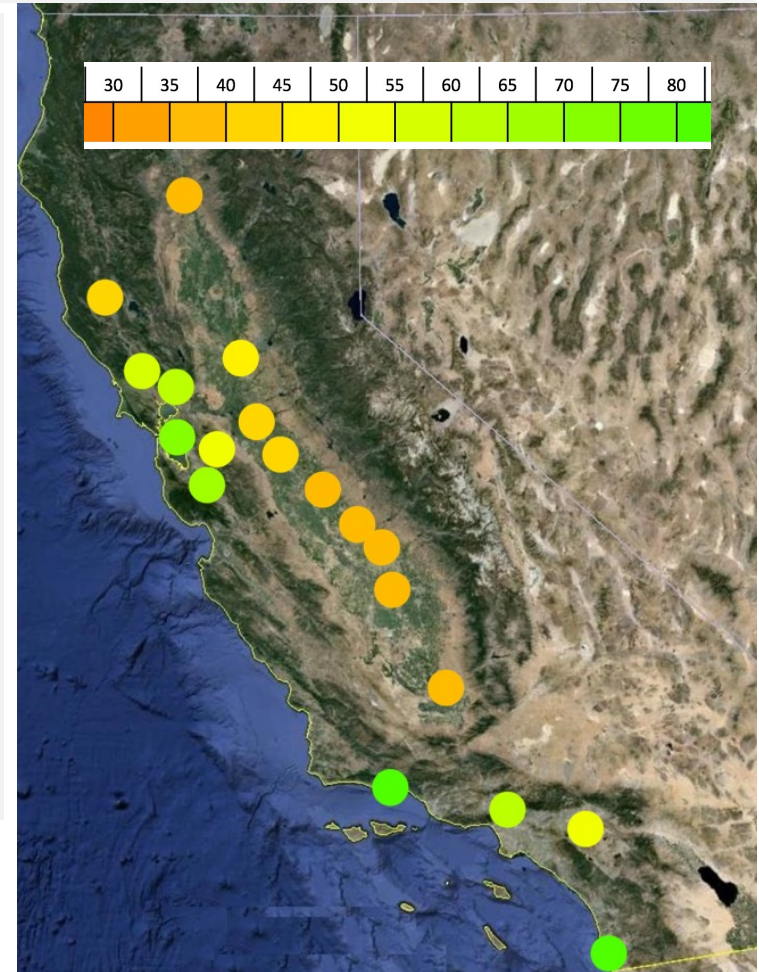
### Mas há esperança!

Os melhores sistemas de VN são capazes de substituir os sistemas mecânicos nos meses mais amenos do ano.

Tendo em conta que um sistemas de ventilação mecânica consome  $5-15W/m^2$ , e que a este valor acresce o sistema de arrefecimento

Obtemos um consumo de energia para AVAC que pode representar 50% -60% do consumo total de energia do edifício.

Nestes casos um bom sistema de VN pode reduzir o consumo de energia de um edifício de escritórios em mais de 30%.



#### P4: Quais é que são as capacidades da VN e como é que os projetistas as estão a utilizar?

RESPOSTA: para edifícios não residenciais, a VN tem a capacidade de fornecer ar novo e arrefecimento (limitado)

Vários estudos sobre desempenho de edifícios com VN indicam que o ar novo mínimo é facilmente obtido para espaços com profundidade limitada (até 6m ou 15m) ou salas grandes com elevado pé direito (> 5m) e exaustão junto ao teto.

A capacidade de arrefecimento da maioria dos sistemas de VN é limitada a 20-30W/m<sup>2</sup> (em climas frios ou amenos).

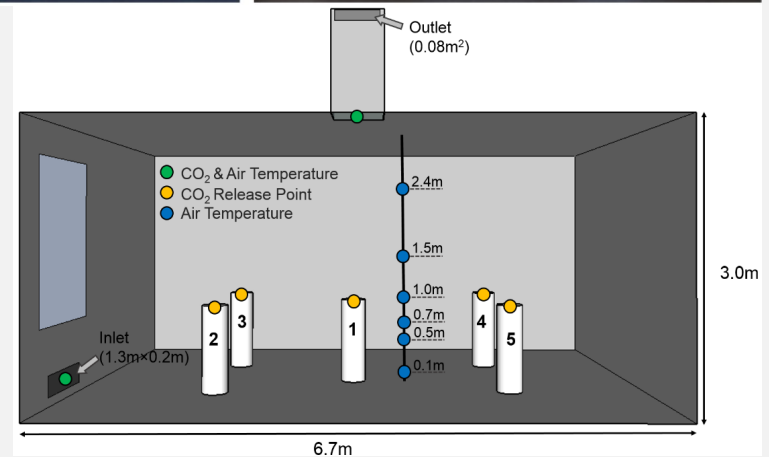
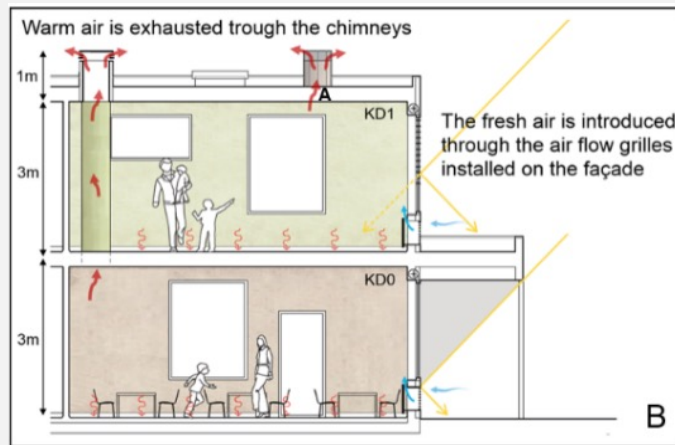
Quando está calor no exterior ... o arrefecimento passa para 0W/m<sup>2</sup>.

A dimensão típica das aberturas usadas é (área total de VN/área de pavimento):

- 1-2% para sistemas que operam entre os 10-20 C
- 3-5% para sistemas que operam até 25 °C
- Até 10% para sistemas NV que tentam fornecer resfriamento em clima quente.

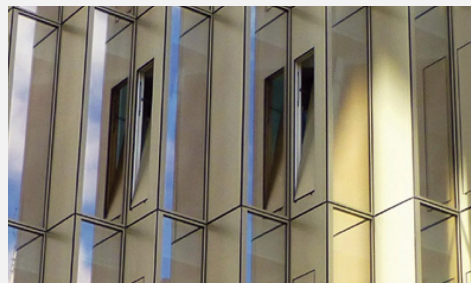
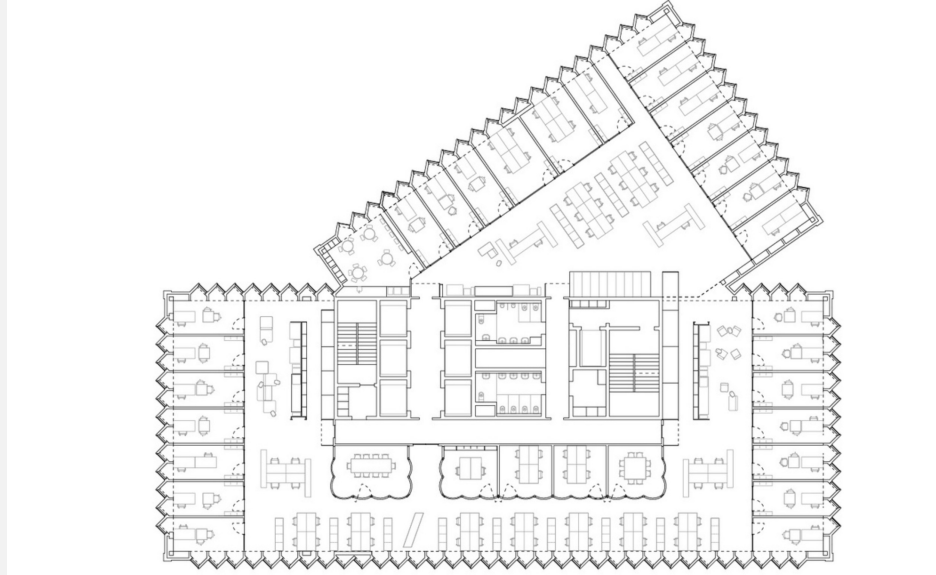
# P4: Exemplo de um projecto com sistema de VN com dois modos

Inverno: 1.5% | Verão: 8%

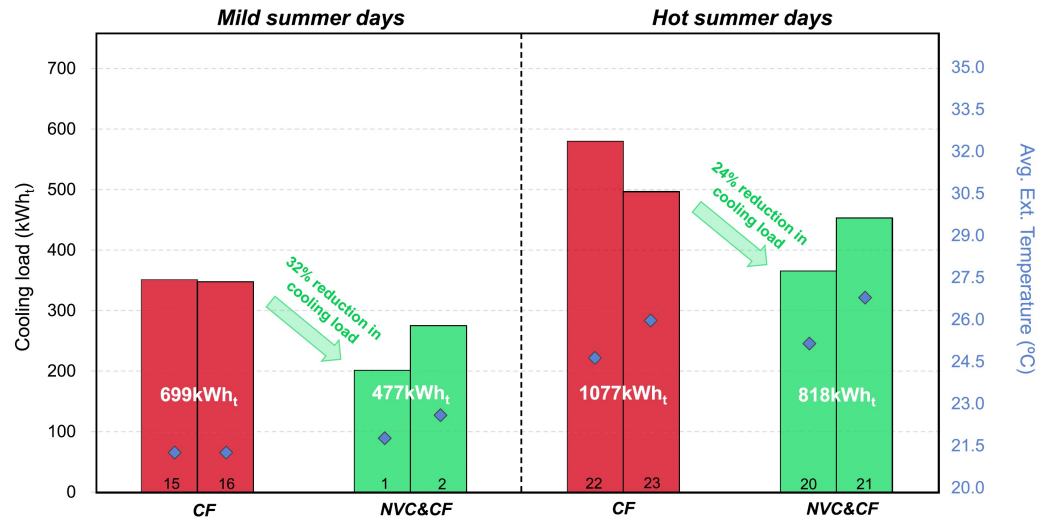


## P4: Exemplo de um projecto com sistema de VN mono-fachada

$$A_j/A_u = 7\%$$



# P4: Redução de necessidades de arrefecimento devido a um sistema de VN para arrefecimento noturno de um átrio. $A_j/A_u = 1\%$



## P5: O ambiente exterior das grandes cidades é adequado para VN?

- As ruas das grandes cidades têm um conhecido **efeito de contenção de ruído e outros poluentes**.
- O **ruído diurno do nível da rua pode atingir 75-80dB (A)**, com uma diminuição de 5-10dB (A) a quinze metros de altura.
- Uma janela aberta em **valores de ruído no interior de 55-65dB (A)** (considerando uma redução no ruído externo de 10-15dB (A))
- O nível médio anual de **partículas finas na atmosfera** na maioria das grandes cidades excede os limites recomendados pela OMS (PM10, PM2.5) .
- Para além deste poluentes as cidades modernas também são afetadas pelo **efeito de ilha de calor** que, em alguns casos, resulta numa subida da temperatura máxima diária em mais de um grau.

## P5: O ambiente exterior das grandes cidades é adequado para VN?

RESPOSTA: Não, na maioria das grandes cidades, o ambiente exterior está contaminado com ruído, partículas finas, calor ou uma combinação dos três. O centro da maioria das cidades modernas é uma ilha de poluição urbana.

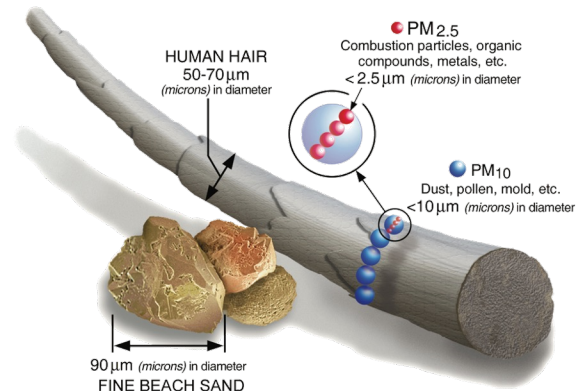
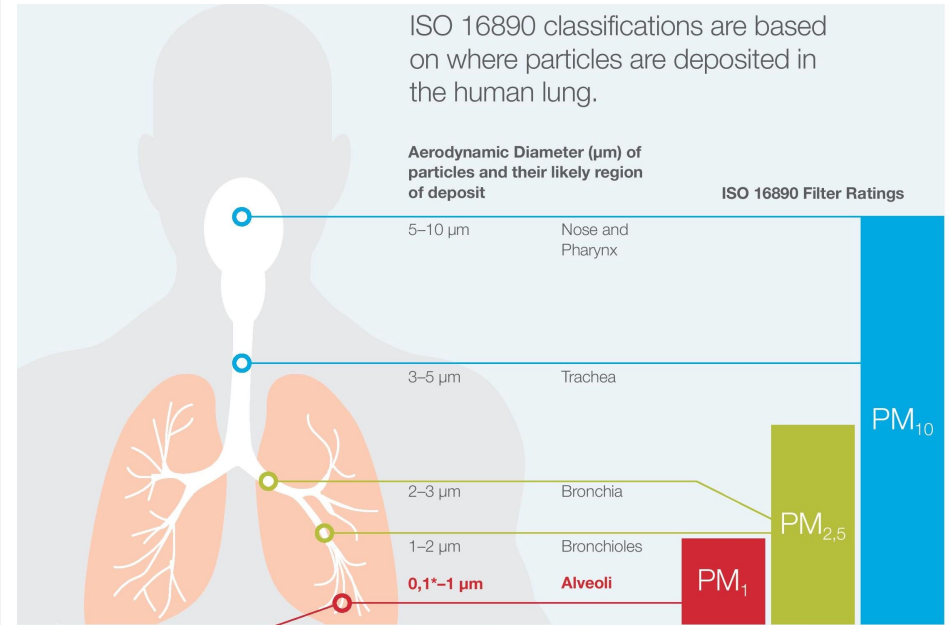
Entre os vários poluentes, as partículas finas (PM2.5) destacam-se pelo seu impacto na saúde.



## P5: Impacto de partículas finas na utilização de VN

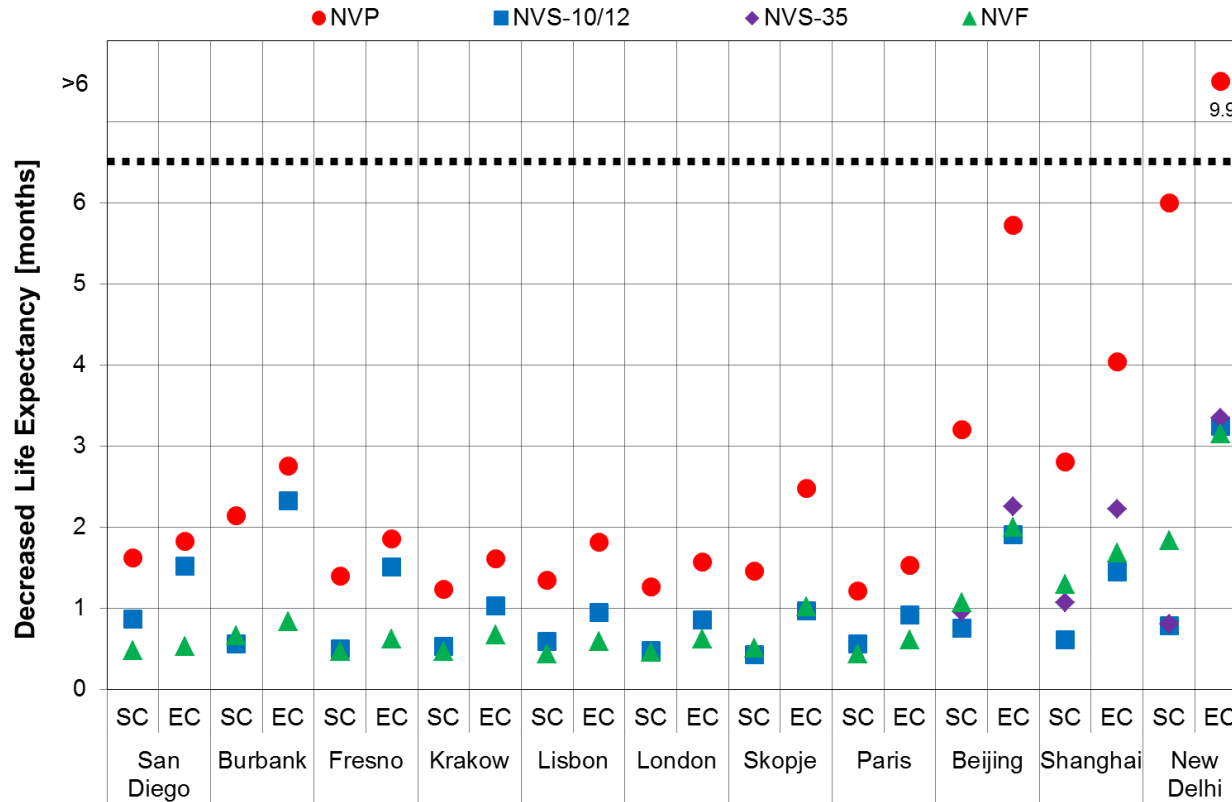
### Principais impactos na saúde dos ocupantes:

- **Irritação** de olhos e pele
- **Inflamação do trato respiratório** e diminuição da resposta imunológica
- Penetração nos alvéolos, **entrando na corrente sanguínea**, chegando ao coração e outros órgãos
- **Aumento de risco de** acidente vascular cerebral, infeção pulmonar, doença cardíaca, cancro do pulmão, tuberculose ...



# P5: Impacto de partículas finas na utilização de VN: análise detalhada

Redução de 0.95 anos de vida por cada ano de exposição adicional de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



## P6: Qual é o impacto esperado das alterações climáticas no desempenho de sistemas de VN em edifícios de serviços?

O aumento da temperatura global é um problema para a VN.

Existem vários estudos que mostram um aumento nas horas anuais de superaquecimento e na carga de arrefecimento mecânico devido às alterações climáticas. **Mas não é fatal para a VN!**

As alterações climáticas trazem um aumento da variabilidade e mudanças na curva típica de distribuição de temperatura.

Dado que os sistemas VN são muito sensíveis às variações de temperatura ao longo do dia: é importante estudar os efeitos das alterações climáticas em base horária e não só.

caught by the skipper, it ceases to revolve. The machine takes up a space six feet by four.

### COAL CONSUMPTION AFFECTING CLIMATE.

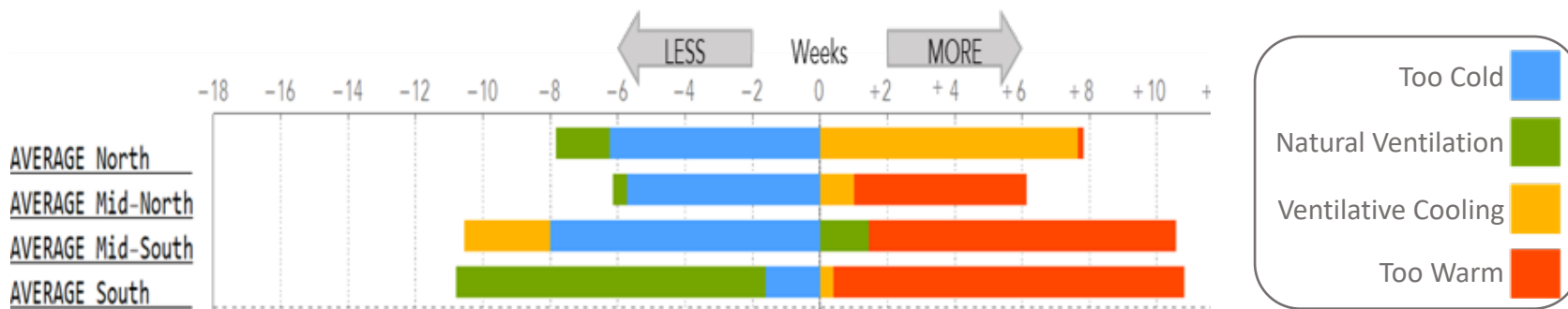
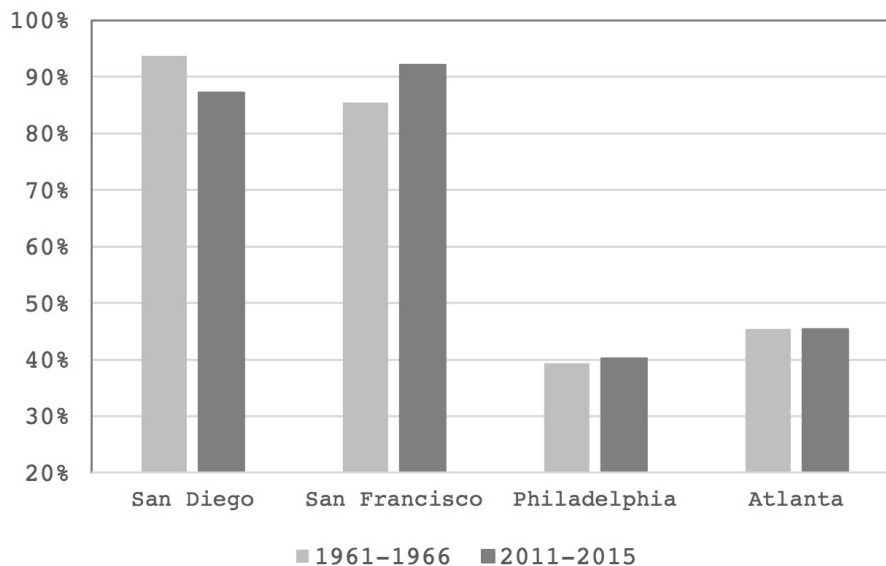
The furnaces of the world are now burning about 2,000,000,000 tons of coal a year. When this is burned, uniting with oxygen, it adds about 7,000,000,000 tons of carbon dioxide to the atmosphere yearly. This tends to make the air a more effective blanket for the earth and to raise its temperature. The effect may be considerable in a few centuries.

NEW RUSSIAN TUNNEL.

Um recorte de jornal de 1912

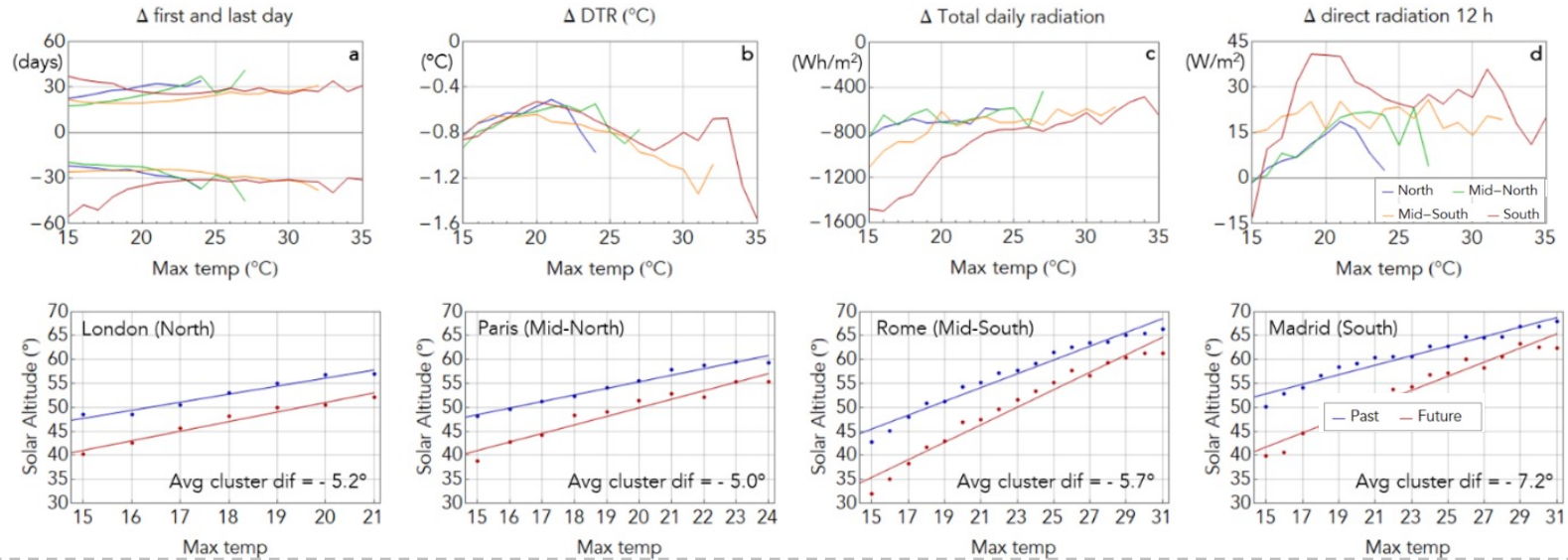
## P6: Impacto esperado das alterações climáticas em sistemas de VN

### Análise estatística

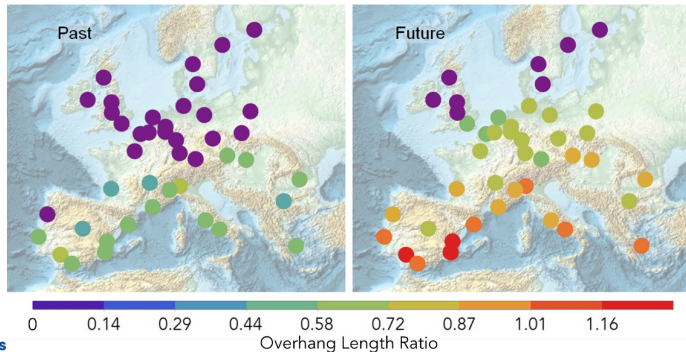


# P6: Qual é o impacto esperado das alterações climáticas na VN?

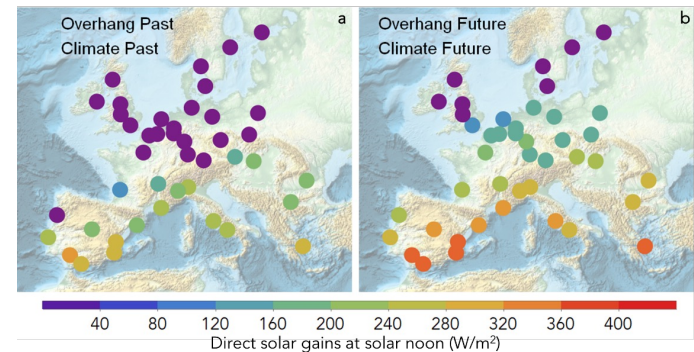
## DAYS WITH SIMILAR MAXIMUM TEMPERATURE



## OVERHANG LENGTH RATIO



## DIRECT SOLAR GAINS AT SOLAR NOON



## P7-10: É possível fazer um escritório “carbon-neutral”?

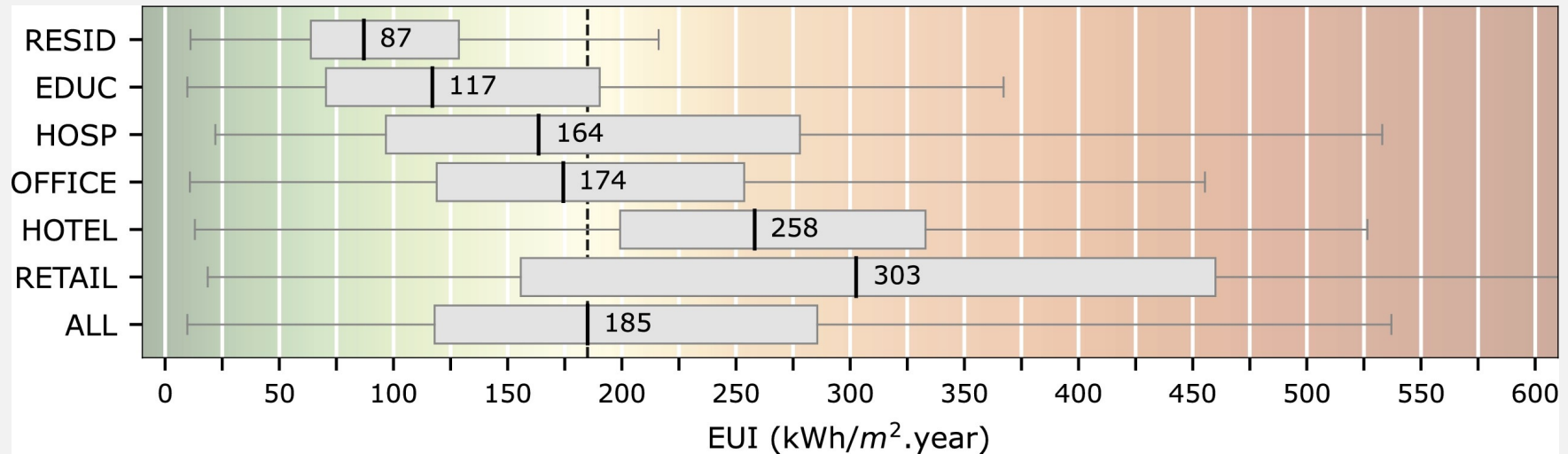


# Vamos analisar o impacto das diferentes components listadas na figura



# Vamos analisar o impacto das diferentes components listadas na figura

## 1. Renewable energy systems and storage



Como é um escritório vamos considerar o valor médio de 150 kWh/m<sup>2</sup> em cada ano.

A única fonte exequível generalizável de en. renovável em meio urbano é o PV vamos ver se vai dar....

# Vamos analisar o impacto das diferentes components listadas na figura

## 1. Renewable energy systems and storage

Em Coimbra temos 1500kWh/m<sup>2</sup> de radiação global considerando uma ocupação de telhado de 80% e uma eficiência de 20% temos:

240kWh de eletricidade por m<sup>2</sup> de telhado.

Não funciona sempre que o ed. tem mais do que 1.5 andares.

Mesmo que gastasse apenas 80 kWh/ano só dá para três pisos.



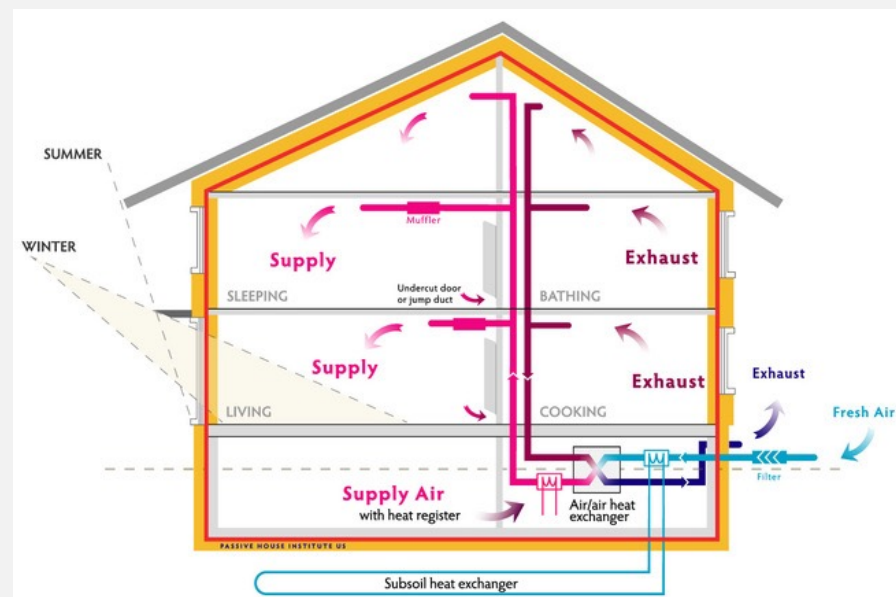
## Vamos analisar o impacto das diferentes components listadas na figura

### 2. Passive House envelope

É uma abordagem muito eficaz para Houses em ed. de serviços tem menos impacto no consumo de energia.

Por ex. : não queremos ganhos solares e temos muito calor no interior.

Poderá não ter um impacto muito relevante no consumo de um escritório típico, open space etc.



# Vamos analisar o impacto das diferentes components listadas na figura

## 3. Mass Timber

Table 3. Whole-building embodied energy (A1–A5)

Reference	Building Type	Scope (Modules)	Embodied Energy	Unit
Dodoo et al. (2014, Energy & Buildings)	Multi-storey residential, Sweden	A1–A5	3.1 GJ/m <sup>2</sup> (timber) vs. 4.6 GJ/m <sup>2</sup> (concrete)	per m <sup>2</sup> GFA
Cabeza et al. (2013, Renew. & Sustain. Energy Rev.)	20+ case studies (review)	A1–A3	2–5 GJ/m <sup>2</sup> typical range	per m <sup>2</sup> GFA
Frontiers in Built Env. (2022)	100 buildings (wood, concrete, steel)	A1–A5	2.9 GJ/m <sup>2</sup> (timber), 4.1 GJ/m <sup>2</sup> (concrete)	per m <sup>2</sup> GFA
Hoxha et al. (2024, J. Clean. Prod.)	Office & residential EU	A1–A5	3–6 GJ/m <sup>2</sup>	per m <sup>2</sup> conditioned area

### 3. Mass Timber

Reference	Building Type	Scope	Timber	Concrete	Reduction	Notes
Dodoo et al. (2014, Energy & Buildings)	6-storey residential	Structure + envelope (A1–A5)	2.1 GJ/m <sup>2</sup>	3.5 GJ/m <sup>2</sup>	~40%	CLT and glulam vs. RC slabs
Frischknecht et al. (Swiss KBOB)	Generic office	A1–A3, structure only	2.0 GJ/m <sup>2</sup>	3.2 GJ/m <sup>2</sup>	~37%	LCI based
Pittau et al. (2021, Energy & Buildings)	Multi-storey office, Italy	Structure + envelope (A1–A5)	1.8–2.3 GJ/m <sup>2</sup>	3.0–3.6 GJ/m <sup>2</sup>	~35–45%	CLT vs. RC
Cabeza et al. (2013, Renew. & Buildings)	Mixed typologies	Structure + envelope (A1–A3)	~2 GJ/m <sup>2</sup>	~3–4 GJ/m <sup>2</sup>	~30–50%	Average of multiple cases

1GJ=277kWh...1000kms EV or 350km in ICE.

Quando estivermos todos em EV a energia para construção de uma casa de 200m2 será equivalente a 600 000km de EV.

### 3. Mass Timber

#### Impact of Transport Distance on Embodied Energy (Lisbon–Finland Scenario)

This table compares embodied energy (A1–A3) and transport energy (A4) contributions for timber imported from Finland versus locally sourced concrete in Lisbon, expressed in GJ/m<sup>2</sup> of floor area.

Material	A1–A3 Production (GJ/m <sup>2</sup> )	A4 Transport (GJ/m <sup>2</sup> )	A1–A4 Total (GJ/m <sup>2</sup> )	Δ vs. Production-only
Timber (Finland → Lisbon)	2.0	0.12	2.12	+6 %
Concrete (local Lisbon)	3.3	0.03	3.33	+1 %

## 4. Natural Light

In contemporary designs the desire to bring in natural light combined with the pressure for spectacular architecture leads to large glazed areas without proper shading that result in large solar gains and increased energy consumption.



Vamos analisar o impacto das diferentes components listadas na figura....

Como é que está a correr....

- |   |  |
|---|--|
| 1. Renewable energy systems and storage:    | NÃO CHEGA  |
| 2. Passive House envelope:                  | NÃO TEM GRANDE IMPACTO                           |
| 3. Mass timber:                             | -40% MAT ENERGY (falta a energia durante o uso!) |
| 4. Natural light:                           | PERIGO   |
| 5. Outdoor walkways:                        | SURE BUT NO IMPACT                               |
| 6. Prefabrication:                          | SURE CAN HELP EMBODIED EN.                       |
| 7. Heat recovery ventilation system (HRVs): | ALREADY DO IT                                    |
| 8. Cross ventilation:                       | <b>LET'S SEE</b>                                 |
| 9. Adaptable layouts:                       | SURE   |
| 10. Open courtyard:                         | SURE IF WE CAN                                   |

## 8. Ventilação Cruzada (cross-ventilation)

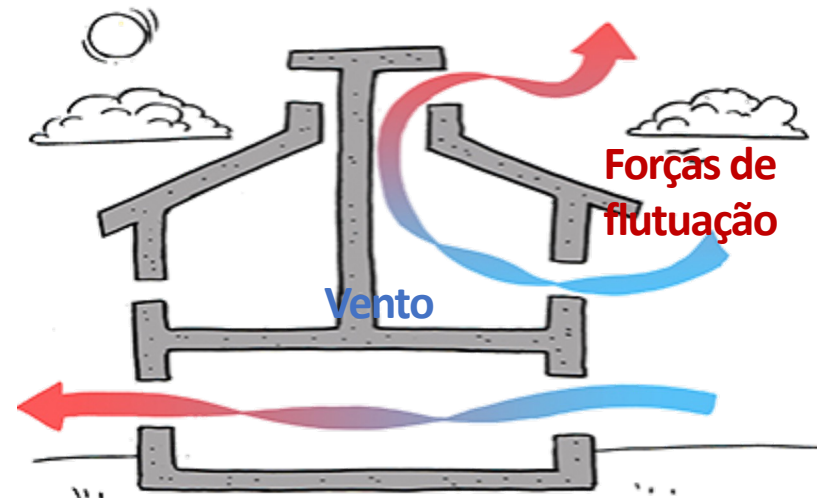
Uma das áreas em que encontramos **falta de eficiência é no aproveitamento das possibilidades dos sistemas de VN nos edifícios de serviços.**

A ventilação natural (NV) ocorre quando as diferenças de pressão geradas por...

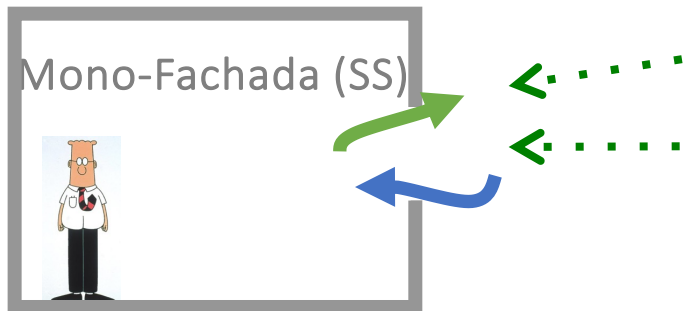
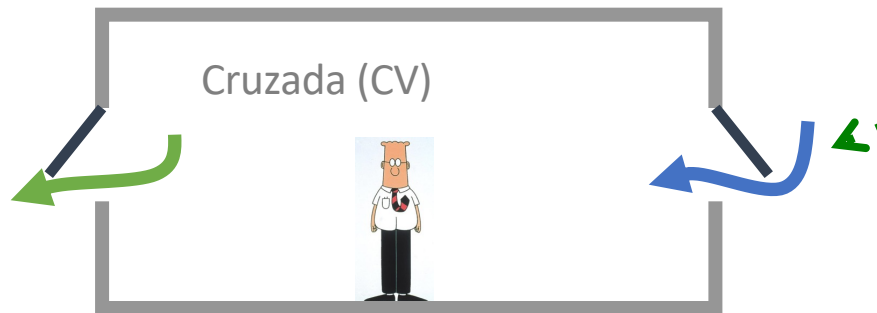
- Vento
- Forças de flutuação

...atuam sobre uma ou mais aberturas na envolvente edifício

As diferenças de pressão variáveis que impulsionam a VN fazem com que o projeto deste tipo de sistemas seja mais difícil do que o projeto de sistemas de ventilação e climatização mecânica.

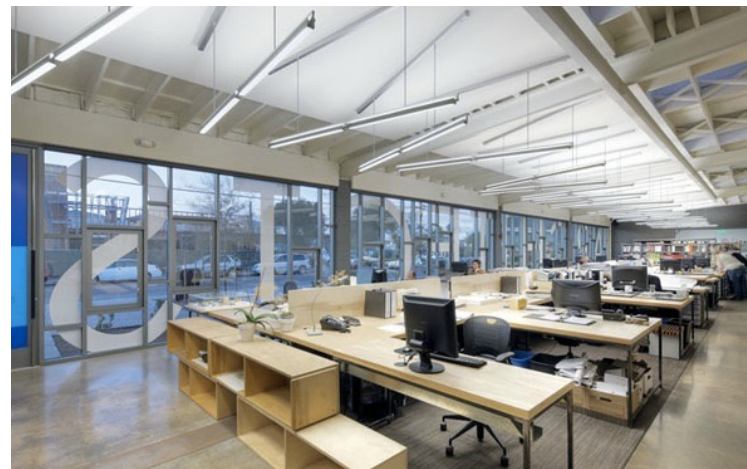
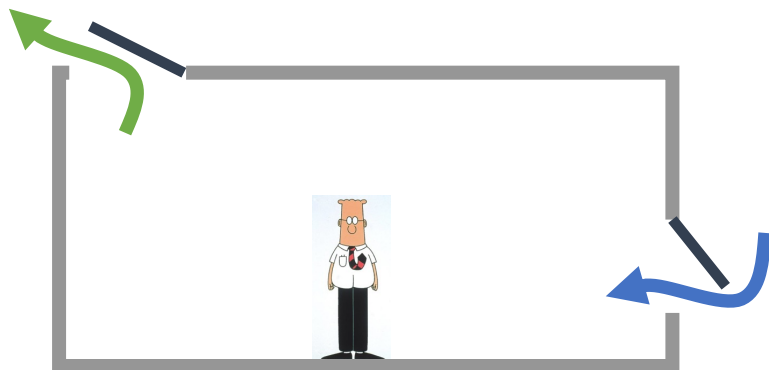


A VN pode ser cruzada, mono-fachada ou por deslocamento vertical

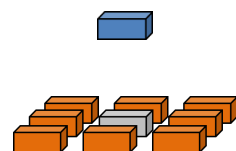
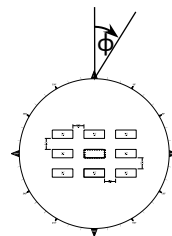
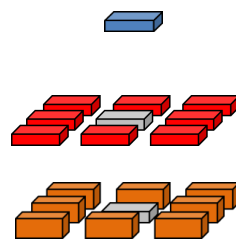
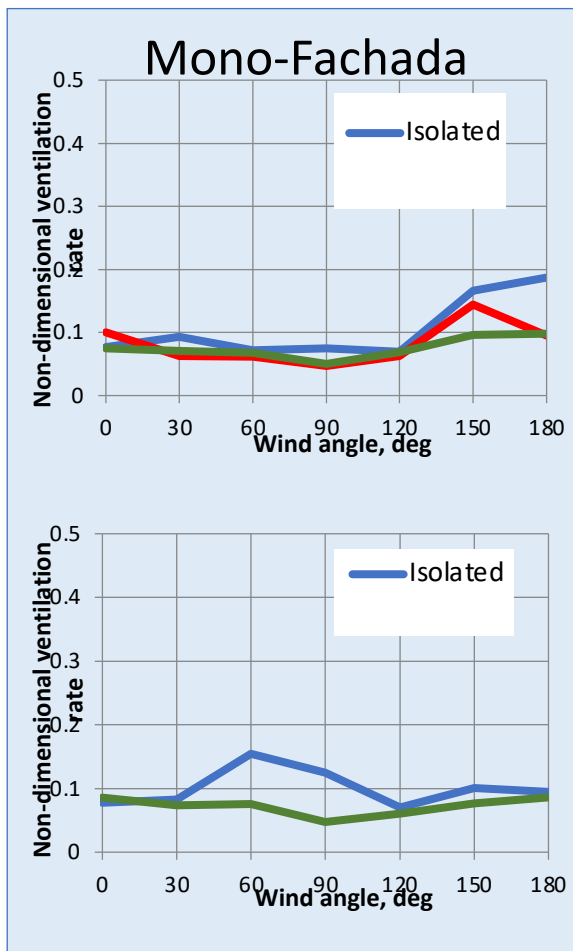


# A VN pode ser cruzada, mono-fachada ou por deslocamento vertical

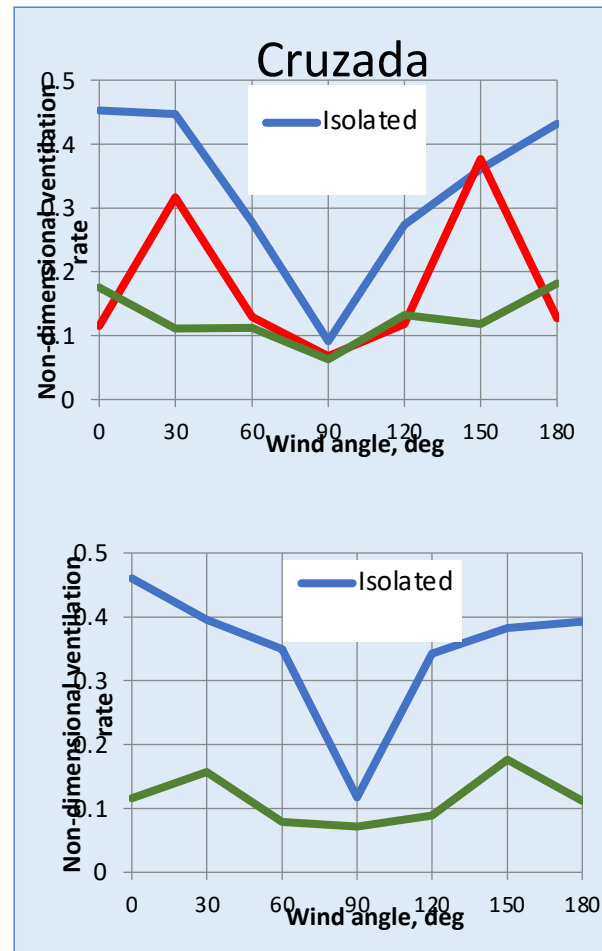
Deslocamento Vertical (DV)



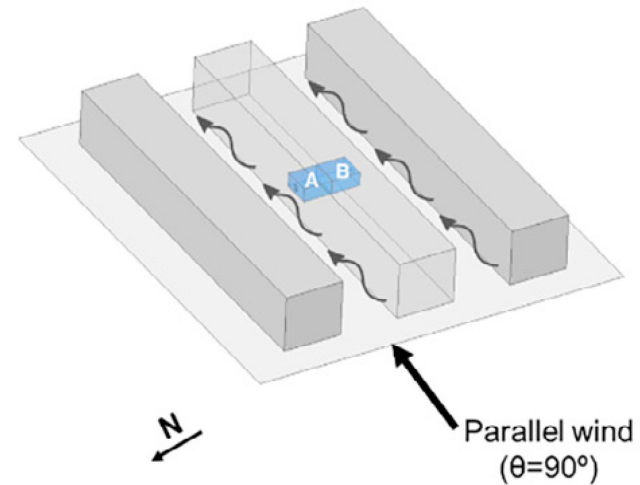
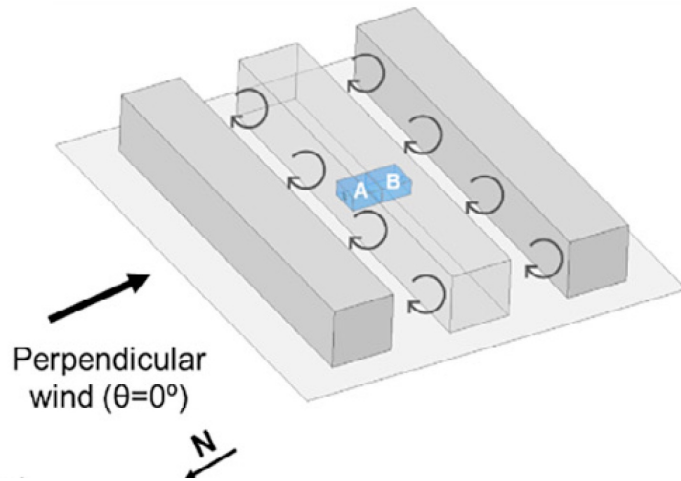
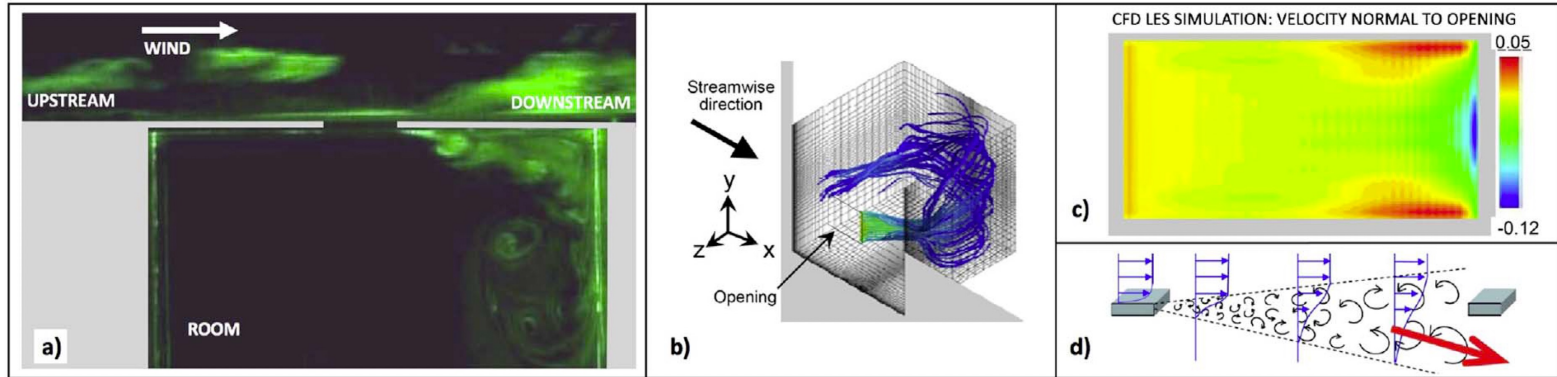
# Em ambiente urbano a ventilação cruzada torna-se semelhante à mono-fachada



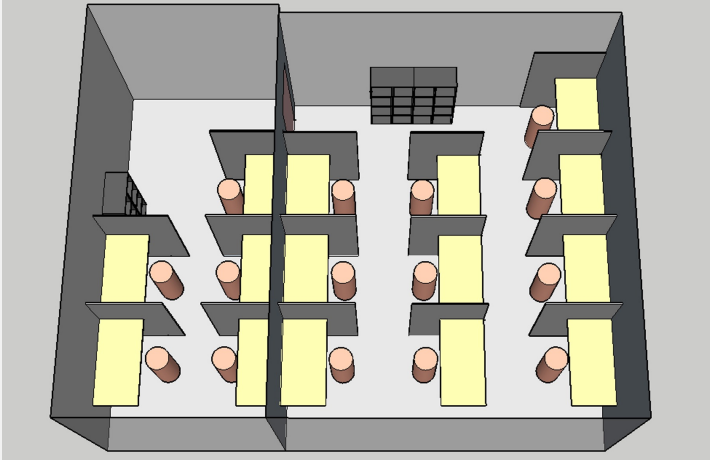
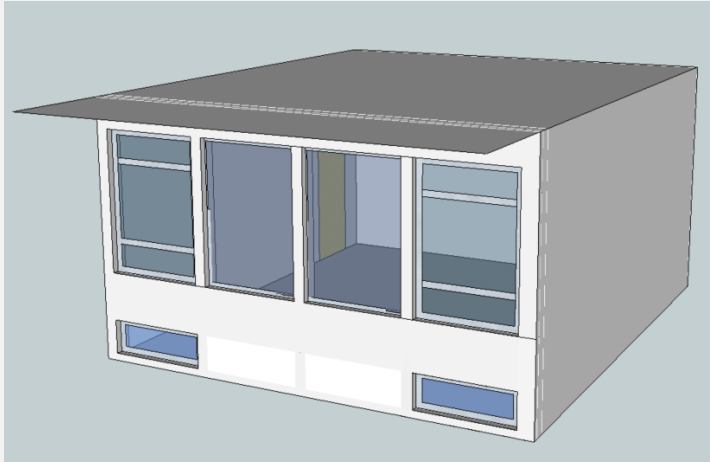
$$Q / \{A_{in} \cdot U(H_B)\}$$



# Em meio urbano o vento é mais fraco e mais imprevisível, ventilação cruzada....?



# Laboratório FCUL para estudo de VN



FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE LISBOA

**FIM**

**Obrigado pela atenção!**

**Estratégias de Ventilação Natural no Ambiente Construído**

Guilherme Carrilho da Graça

Prof. Ass. Ag. FCUL

Lic. Eng. Física (IST), MSc (MIT), PhD (UCSD), Esp. Climatização (OE).

15 de Outubro de 2025