

Sua casa: luz, sol, calor e vento

Casa Maringá · relatório de simulação · Maringá, PR (lat -23,41, lon -51,93) · 17 de outubro de 2026
Clima: ano típico de BRA_PR_Maringá.868990_TMYx.2011-2025.epw · sol anual 1.882 kWh/m² · temperatura média 23,0 °C · vento médio 2,3 m/s

Como ler este relatório. Cada número vem com uma etiqueta colorida que diz se ele é bom ou ruim, em um **nível de 1 (péssimo) a 5 (excelente)**:

Excelente 5/5 Bom 4/5 Aceitável 3/5 Ruim 2/5 Péssimo 1/5

Cada etiqueta se baseia em uma **norma brasileira (ABNT)** quando existe, em um **padrão internacional** quando o Brasil não dá um número, ou em uma **regra prática** claramente identificada. Os quadros *O que conta como bom?* no fim de cada seção mostram a escala completa e a fonte. As paredes do modelo foram supostas como: *Bloco cerâmico furado de 8 furos 9x19x19 cm + 2 cm de reboco nos dois lados = parede de 13 cm (bloco padrão brasileiro)*; cobertura: *Telha cerâmica + sótão ventilado + laje de concreto de 12 cm*. Esses materiais e os tamanhos de janela (medidas comuns de catálogo por volta de 2012) são estimativas, não medições: use os resultados para comparar ambientes e opções, não como garantia.

1. Resumo

Cada ambiente é avaliado em até nove verificações, cada uma em um **nível de 1 (péssimo) a 5 (excelente)**; a coluna GERAL é o nível médio. As próximas páginas explicam cada verificação; a coluna de climatização mostra quanto um ar-condicionado custaria por ano:

Ambiente	Luz natural (NBR 15575)	Lâmpadas apagadas de dia	Sol na janela	Horas de conforto	Dia quente	Dia frio	Janela abrível	Custo de climatização	GERAL
Sala de estar + jantar	Intermediário 4/5	Frequentemente 4/5	Abaixo do mínimo 2/5	Bom 4/5	Intermediário 4/5	Superior 5/5	Atende ao mínimo 3/5	R\$ 844/ano Baixa 4/5	Bom 3,7/5
Corredor	Sem exigência 3/5	Quase nunca 1/5	-	Excelente 5/5	-	-	-	-	Aceitável 3,0/5
Quarto 1	Superior 5/5	Quase sempre 5/5	Médio 4/5	Bom 4/5	Superior 5/5	Superior 5/5	Não atende 1/5	R\$ 153/ano Muito baixa 5/5	Bom 4,1/5
Banheiro 1	Intermediário 4/5	Quase nunca 1/5	-	Bom 4/5	-	-	-	-	Aceitável 3,0/5
Quarto 2	Intermediário 4/5	Às vezes 3/5	Abaixo do mínimo 2/5	Bom 4/5	Superior 5/5	Superior 5/5	Não atende 1/5	R\$ 112/ano Muito baixa 5/5	Bom 3,6/5
Banheiro 2	Superior 5/5	Quase nunca 1/5	-	Bom 4/5	-	-	-	-	Aceitável 3,3/5
Quarto 3	Superior 5/5	Frequentemente 4/5	Abaixo do mínimo 2/5	Bom 4/5	Superior 5/5	Superior 5/5	Não atende 1/5	R\$ 110/ano Muito baixa 5/5	Bom 3,8/5
Cozinha	Superior 5/5	Quase sempre 5/5	Abaixo do mínimo 2/5	Aceitável 3/5	-	-	Atende ao mínimo 3/5	R\$ 363/ano Moderada 3/5	Bom 3,7/5
Banheiro externo	-	Raramente 2/5	-	Aceitável 3/5	-	-	-	-	Aceitável 2,5/5
Depósito externo	-	Quase sempre 5/5	-	Aceitável 3/5	-	-	-	-	Bom 4,0/5
Casa inteira								R\$ 1.582/ano	Bom 3,6/5

O que funciona bem

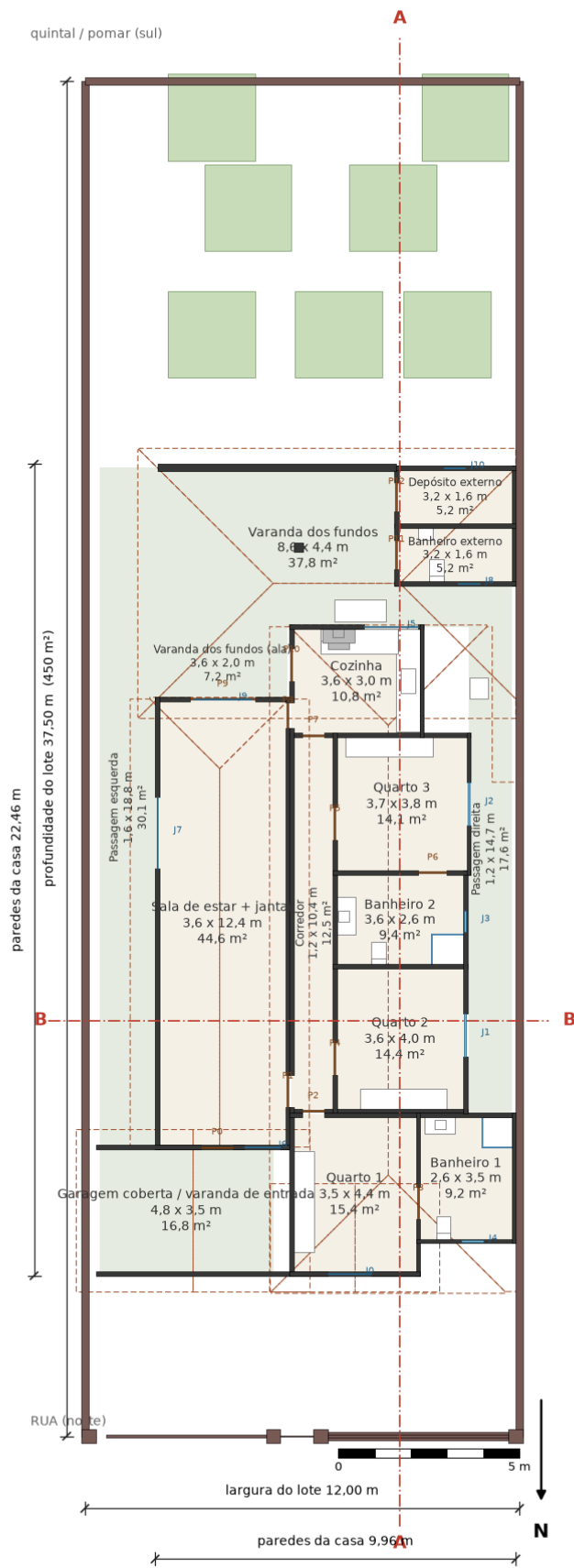
- TV / jantar (fundos): 408 lux de luz natural no centro (nível superior da NBR 15575)
- Quarto 1: 513 lux de luz natural no centro (nível superior da NBR 15575)
- Quarto 3: 123 lux de luz natural no centro (nível superior da NBR 15575)
- Cozinha: 188 lux de luz natural no centro (nível superior da NBR 15575)
- Ambiente mais confortável: Corredor (92% do ano na faixa de conforto; ao ar livre só 48%)
- Transmitância térmica U da parede externa: 2,52 W/m²K atende ao limite <= 3,7
- Capacidade térmica da parede externa: 134,0 kJ/m²K atende ao limite >= 130

O que merece atenção

- Sala de estar (frente): lâmpadas necessárias em cerca de 53% das horas do dia
- Quarto 2: lâmpadas necessárias em cerca de 60% das horas do dia
- Ambiente menos confortável: Banheiro externo (73%; 1546 h quente demais, 815 h frio demais)
- Quarto 1: área de janela abrível de só 4,7% do piso (a NBR 15575-4 pede 7%)
- Quarto 2: área de janela abrível de só 5,0% do piso (a NBR 15575-4 pede 7%)
- Quarto 3: área de janela abrível de só 5,1% do piso (a NBR 15575-4 pede 7%)
- Transmitância térmica U da cobertura (indicativa): 1,78 W/m²K contra o limite <= 1,5

PLANTA BAIXA - térreo

A casa é voltada para o NORTE (rua embaixo) - ambientes com nome, medidas e área; cor



Escala 1:150 - medidas são estimativas de uma varredura em vídeo e do anúncio, não um levantamento

Planta do modelo (norte embaixo).

2. Luz natural

A luz natural economiza energia e deixa os ambientes agradáveis. A norma brasileira NBR 15575 pede pelo menos **60 lux** no centro de salas, dormitórios e cozinhas (lux = quanta luz chega a uma mesa). Para comparar: um dia claro e nublado ao ar livre tem milhares de lux.

2,1 Ensaio brasileiro: luz no centro do ambiente, lâmpadas apagadas

Ambiente	Lux no centro	Veredito
Sala de estar (frente)	91	Intermediário 4/5
TV / jantar (fundos)	408	Superior 5/5
Corredor	0	Sem exigência 3/5
Quarto 1	513	Superior 5/5
Banheiro 1	42	Intermediário 4/5
Quarto 2	93	Intermediário 4/5
Banheiro 2	48	Superior 5/5
Quarto 3	123	Superior 5/5
Cozinha	188	Superior 5/5
Banheiro externo	53	Não atende 1/5
Depósito externo	139	Superior 5/5

Calculado com: **Motor rápido (Python, deste projeto)** - detalhes e confiabilidade na seção 9

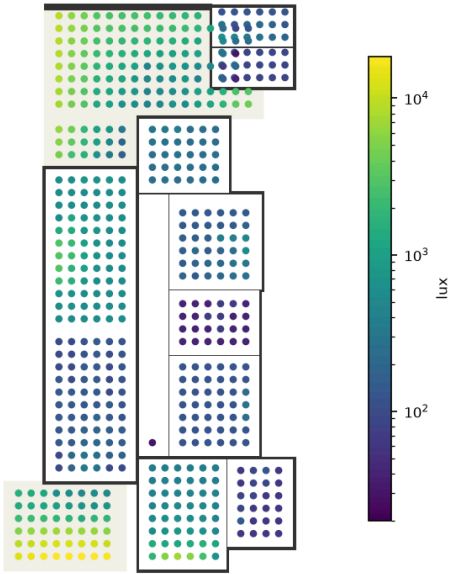
2,2 Quanto do ambiente é claro, e quando preciso de lâmpada?

Ambiente	Meta (lux)	Piso que atinge a meta	Dia com lâmpadas apagadas	Sol forte (ASE)
Sala de estar (frente)	150	26% Abaixo da meta 2/5	47% Às vezes 3/5	0% Muito baixa 5/5
TV / jantar (fundos)	150	100% Ambiente inteiro 5/5	96% Quase sempre 5/5	0% Muito baixa 5/5
Corredor	-	-	0% Quase nunca 1/5	0% Muito baixa 5/5
Quarto 1	100	100% Ambiente inteiro 5/5	96% Quase sempre 5/5	10% Alta 2/5
Banheiro 1	-	-	1% Quase nunca 1/5	0% Muito baixa 5/5
Quarto 2	100	100% Ambiente inteiro 5/5	40% Às vezes 3/5	0% Muito baixa 5/5
Banheiro 2	-	-	0% Quase nunca 1/5	0% Muito baixa 5/5
Quarto 3	100	100% Ambiente inteiro 5/5	70% Frequentemente 4/5	0% Muito baixa 5/5
Cozinha	200	100% Ambiente inteiro 5/5	81% Quase sempre 5/5	0% Muito baixa 5/5
Banheiro externo	-	-	14% Raramente 2/5	0% Muito baixa 5/5
Depósito externo	-	-	78% Quase sempre 5/5	0% Muito baixa 5/5

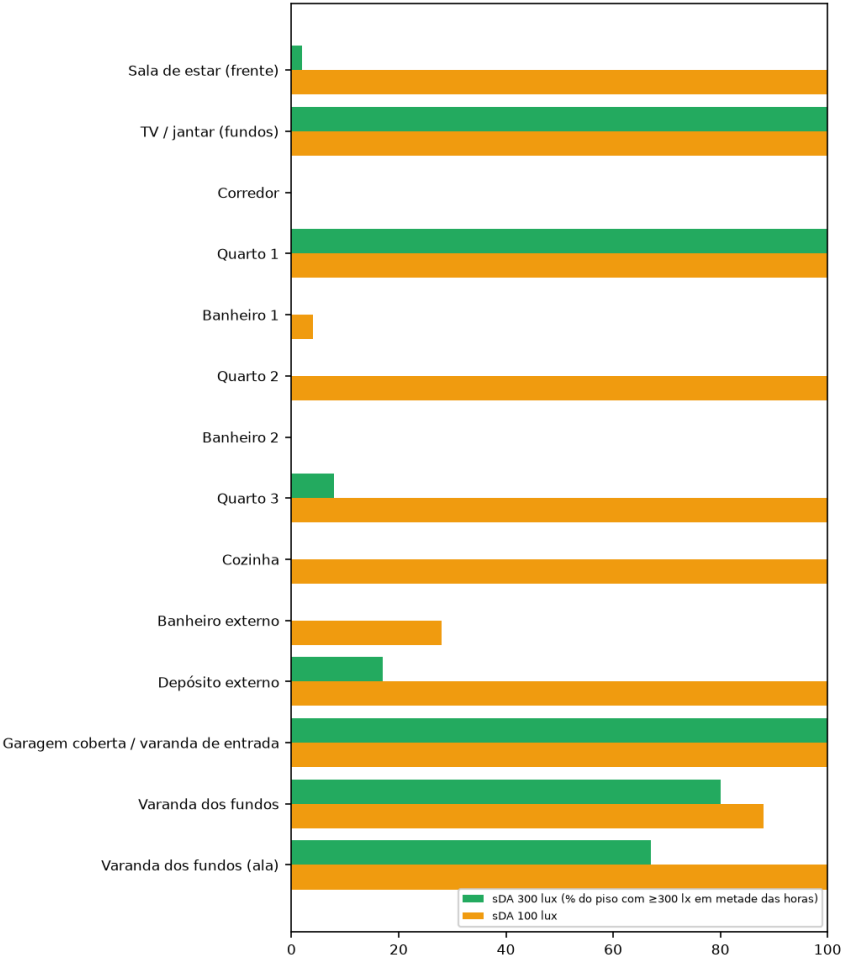
Calculado com: **Motor rápido (Python, deste projeto)** - detalhes e confiabilidade na seção 9

Meta = o nível de luz natural que a EN 17037 (Anexo Nacional do Reino Unido para moradias) recomenda: 100 lux dormitório, 150 lux sala, 200 lux cozinha. "Lâmpadas apagadas" = parcela das horas entre 8h e 18h em que a média de luz natural já atinge o nível de luz geral da seção 3.

luminância média 8h-18h, ano todo (lux, plano de trabalho)



Autonomia de luz natural por ambiente (8h-18h)

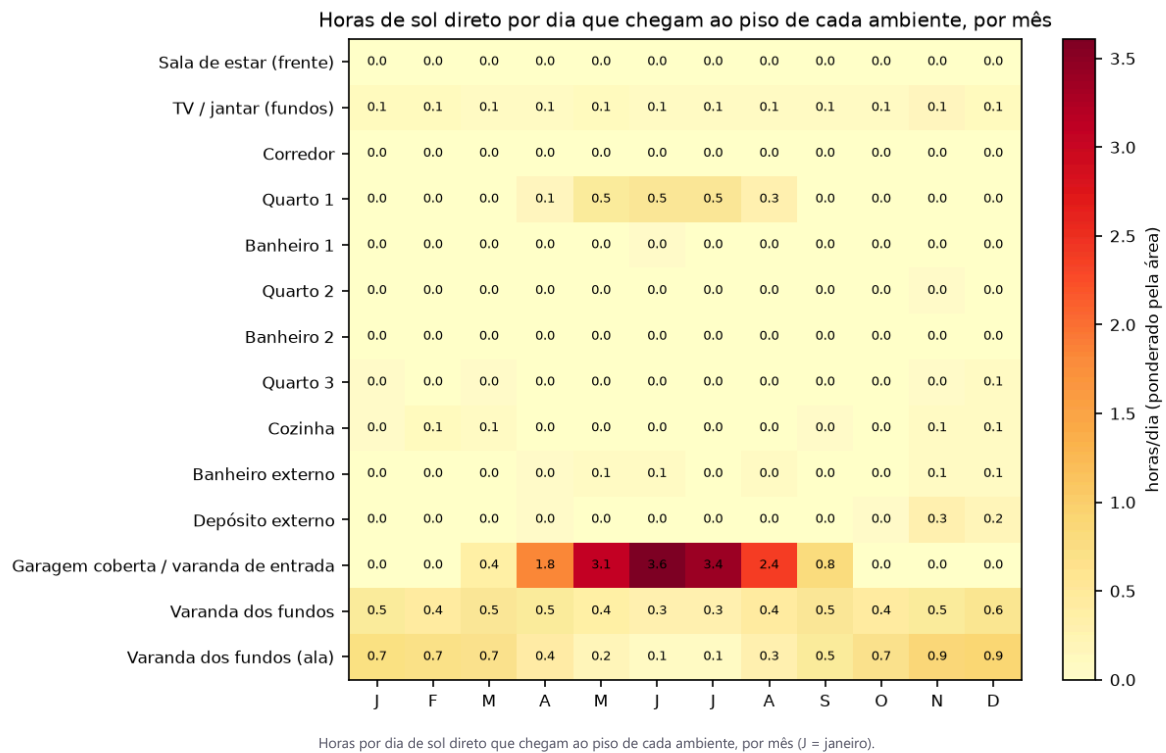


Esquerda: luz média no piso ao longo do ano. Direita: parcela de cada ambiente que atinge 100 e 300 lux.

2,3 Sol que chega às janelas

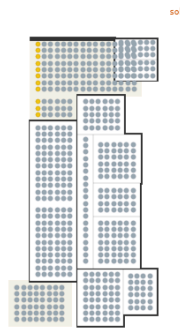
Ambiente	Sol na janela, horas/dia (início da primavera)	Veredito
Sala de estar (frente)	0,0	Abaixo do mínimo 2/5
TV / jantar (fundos)	0,3	Abaixo do mínimo 2/5
Quarto 1	3,7	Médio 4/5
Quarto 2	0,0	Abaixo do mínimo 2/5
Quarto 3	0,0	Abaixo do mínimo 2/5
Cozinha	0,0	Abaixo do mínimo 2/5

Calculado com: Motor rápido (Python, deste projeto) - detalhes e confiabilidade na seção 9

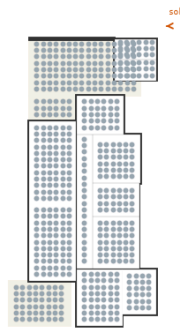


Onde o sol bate no piso (amarelo = sol direto a 0,76 m de altura). O norte verdadeiro fica embaixo em cada planta, o leste à esquerda.

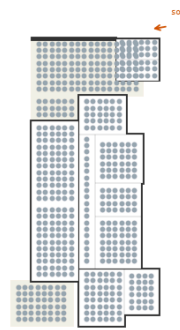
21 dez 9:30 (sol a 50°, vindo de SE)



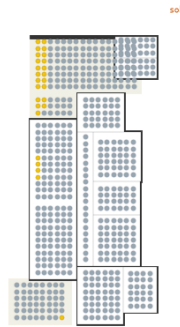
21 dez 12:30 (sol a 89°, vindo de SO)



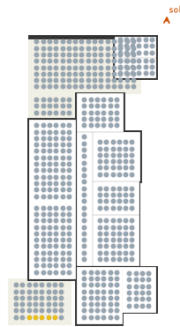
21 dez 15:30 (sol a 48°, vindo de SO)



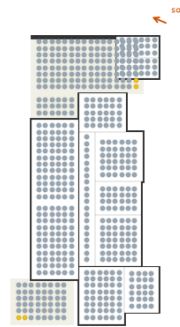
21 mar 9:30 (sol a 39°, vindo de SE)



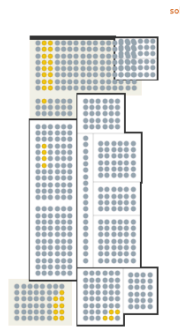
21 mar 12:30 (sol a 66°, vindo de NE)



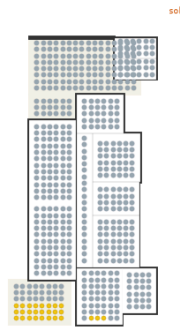
21 mar 15:30 (sol a 41°, vindo de NO)



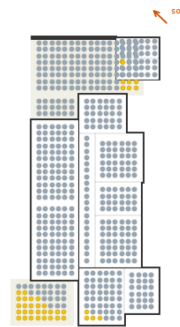
21 jun 9:30 (sol a 26°, vindo de NE)



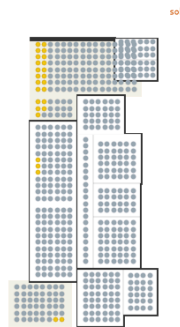
21 jun 12:30 (sol a 43°, vindo de NO)



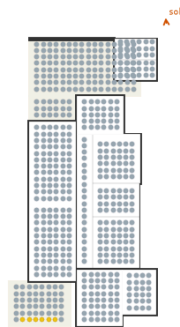
21 jun 15:30 (sol a 26°, vindo de NO)



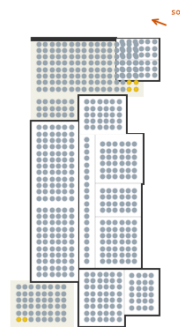
21 set 9:30 (sol a 42°, vindo de NE)



21 set 12:30 (sol a 66°, vindo de NO)



21 set 15:30 (sol a 38°, vindo de NO)



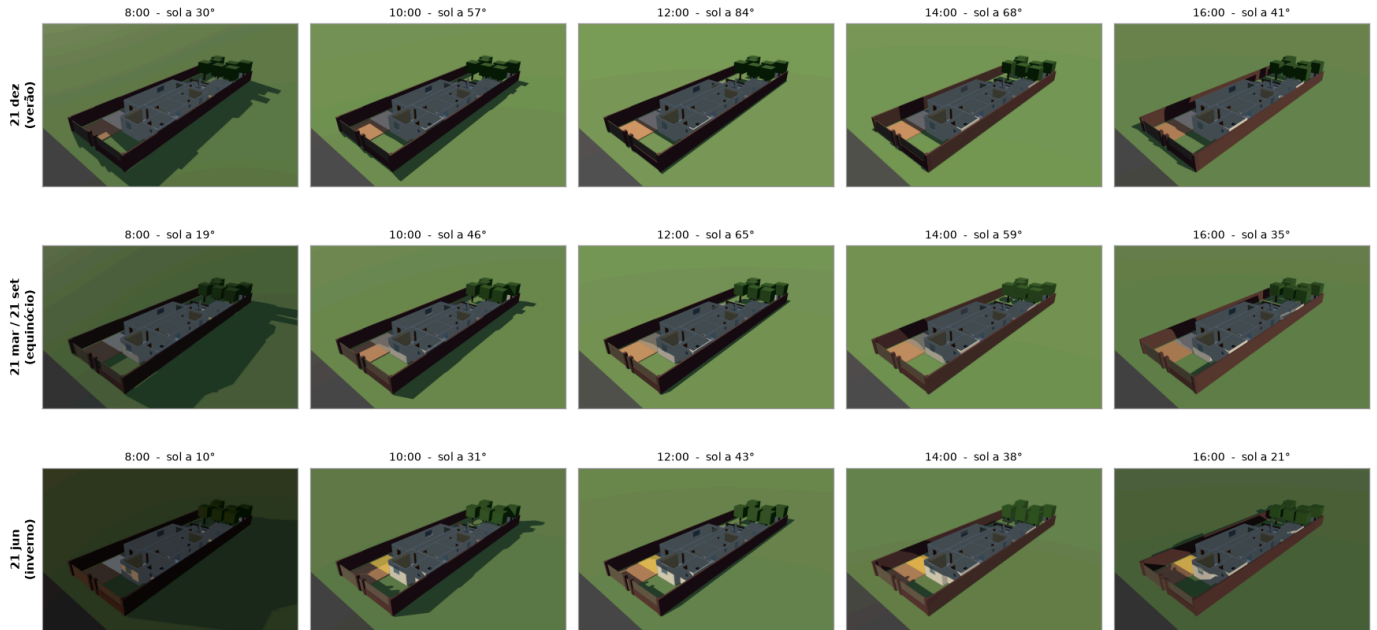
Onde o sol bate no piso em quatro datas-chave.

2,4 O sol e suas sombras ao longo do dia no modelo 3D

Calculado com: **Motor rápido (Python, deste projeto)** - detalhes e confiabilidade na seção 9

Estas imagens vêm do mesmo modelo 3D e do mesmo cálculo do sol do visualizador interativo: três datas-chave, cinco horários. São desenhadas as sombras da casa, da cobertura, dos muros e das árvores; os pisos que recebem sol direto ficam amarelos/laranja. no inverno o sol baixo entra fundo nos ambientes voltados para ele, enquanto no verão o sol fica alto ao meio-dia e a cobertura sombreia a casa.

O sol e suas sombras ao longo do dia no modelo 3D (vista do noroeste: o lado norte está mais perto de você)



Bússola: o leste fica à esquerda de cada imagem e o oeste à direita, então o sol nasce à esquerda e se põe à direita. Piso amarelo = sol direto.

Sol e sombras ao longo do dia: vista 3D do noroeste (frente / rua mais perto).

O sol e suas sombras ao longo do dia, vistos de cima (norte verdadeiro embaixo)



Bússola: o leste fica à esquerda de cada imagem e o oeste à direita, então o sol nasce à esquerda e se põe à direita. Piso amarelo = sol direto.

Os mesmos momentos vistos de cima (rua / frente embaixo).

O que conta como bom? (luz)

Luz natural no centro do ambiente (ensaio da NBR 15575) Norma brasileira

Luz natural em um plano na altura de uma mesa (0,75 m), no meio do ambiente, em 23 de abril e 23 de outubro às 9h30 e às 15h30, com céu parcialmente nublado e lâmpadas apagadas. Vale a menor das quatro leituras. Aplica-se a salas, dormitórios, cozinhas e áreas de serviço.

Não atende 1/5	abaixo de 60 lux	Abaixo do mínimo de 60 lux: é preciso acender a luz até ao meio-dia.
Mínimo 3/5	60 a 90 lux	Atende ao mínimo exigido pela norma.
Intermediário 4/5	90 a 120 lux	Melhor que o mínimo.
Superior 5/5	120 ou mais lux	Nível máximo da norma.

Esta casa: Sala de estar (frente) 91 lux Intermediário 4/5 | TV / jantar (fundos) 408 lux Superior 5/5 | Quarto 1 513 lux Superior 5/5 | Quarto 2 93 lux Intermediário 4/5 | Quarto 3 123 lux Superior 5/5 | Cozinha 188 lux Superior 5/5

Fonte: ABNT NBR 15575-1:2013 (Edificações habitacionais — Desempenho), requisitos de iluminação natural e desempenho térmico. Nosso cálculo usa o clima típico da semana em torno dessas datas e só a luz do céu (sem sol direto), portanto fica a favor da segurança.

Luz natural no centro do ambiente (ensaio da NBR 15575): banheiros, corredores, escadas, garagens Norma brasileira

O mesmo ensaio, para ambientes onde as pessoas não ficam muito tempo.

Sem exigência 3/5	abaixo de 30 lux	A norma não exige luz natural aqui (nível mínimo: "não requerido").
Intermediário 4/5	30 a 45 lux	Atende ao nível intermediário.
Superior 5/5	45 ou mais lux	Atende ao nível superior.

Esta casa: Corredor 0 lux Sem exigência 3/5 | Banheiro 1 42 lux Intermediário 4/5 | Banheiro 2 48 lux Superior 5/5

Fonte: ABNT NBR 15575-1:2013 (Edificações habitacionais — Desempenho), requisitos de iluminação natural e desempenho térmico.

Parcela do piso que atinge a luz recomendada para moradias Padrão internacional

Porcentagem do piso do ambiente que recebe, só de luz natural, pelo menos a luz-meta (100 lux no dormitório, 150 lux na sala, 200 lux na cozinha) durante pelo menos metade das horas do dia (8h às 18h).

Abaixo da meta 2/5	abaixo de 50 % do piso	Menos da metade do ambiente atinge a meta: será preciso acender lâmpadas de dia.
Atende à meta 4/5	50 a 95 % do piso	Pelo menos metade do piso atinge a meta durante metade do dia.
Ambiente inteiro 5/5	95 ou mais % do piso	Praticamente todo o ambiente atinge a meta.

Esta casa: Sala de estar (frente) 26% Abaixo da meta 2/5 | TV / jantar (fundos) 100% Ambiente inteiro 5/5 | Quarto 1 100% Ambiente inteiro 5/5 | Quarto 2 100% Ambiente inteiro 5/5 | Quarto 3 100% Ambiente inteiro 5/5 | Cozinha 100% Ambiente inteiro 5/5

Fonte: EN 17037:2018 Iluminação natural em edifícios (Anexo Nacional do Reino Unido para moradias: 100/150/200 lx; insolação 1,5/3/4 h). A EN 17037 pede a luz-meta em pelo menos 50% da área durante metade das horas de luz do dia (mais um nível menor em 95% da área).

Autonomia espacial de luz natural sDA 300/50% (padrão para ambientes de trabalho) Padrão internacional

Porcentagem do piso com pelo menos 300 lux de luz natural durante pelo menos metade das horas de uso. 300 lux é um nível de luz de TRABALHO; portanto este é um teste rigoroso, útil para escritório em casa, cozinha ou estudo. Dormitórios e corredores não precisam chegar lá.

Abaixo do recomendado 2/5	abaixo de 55 % do piso	Menos de 55% do piso atinge 300 lux durante metade do dia.
Nominalmente aceitável 3/5	55 a 75 % do piso	Aceito pela IES / LEED (55% ou mais).
Preferível 5/5	75 ou mais % do piso	Nível preferível (75% ou mais).

Esta casa: Sala de estar (frente) 2% Abaixo do recomendado 2/5 | TV / jantar (fundos) 100% Preferível 5/5 | Corredor 0% Abaixo do recomendado 2/5 | Quarto 1 100% Preferível 5/5 | Banheiro 1 0% Abaixo do recomendado 2/5 | Quarto 2 0% Abaixo do recomendado 2/5 | Banheiro 2 0% Abaixo do recomendado 2/5 | Quarto 3 8% Abaixo do recomendado 2/5 | Cozinha 0% Abaixo do recomendado 2/5 | Banheiro externo 0% Abaixo do recomendado 2/5 | Depósito externo 17% Abaixo do recomendado 2/5

Fonte: IES LM-83-12 (sDA e ASE), como usado no LEED v4.1.

Exposição solar anual ASE (risco de ofuscamento e superaquecimento) Padrão internacional

Porcentagem do piso que recebe sol direto forte (acima de 1000 lux) por mais de 250 horas por ano. Valores altos significam ofuscamento, móveis desbotados e calor.

Muito baixa 5/5	abaixo de 3 % do piso	Quase nenhum sol direto forte.
Aceitável 4/5	3 a 10 % do piso	Dentro do limite de 10% usado pela IES / LEED.
Alta 2/5	10 a 20 % do piso	Acima do limite de 10%: considere cortinas, persianas ou um beiral.
Muito alta 1/5	20 ou mais % do piso	Grande área com sol forte por muito tempo: ofuscamento e calor prováveis.

Esta casa: Sala de estar (frente) 0% Muito baixa 5/5 | TV / jantar (fundos) 0% Muito baixa 5/5 | Corredor 0% Muito baixa 5/5 | Quarto 1 10% Alta 2/5 | Banheiro 1 0% Muito baixa 5/5 | Quarto 2 0% Muito baixa 5/5 | Banheiro 2 0% Muito baixa 5/5 | Quarto 3 0% Muito baixa 5/5 | Cozinha 0% Muito baixa 5/5 | Banheiro externo 0% Muito baixa 5/5 | Depósito externo 0% Muito baixa 5/5

Fonte: IES LM-83-12 (sDA e ASE), como usado no LEED v4.1.

Horas do dia sem precisar de lâmpadas Regra prática

Parcela das horas do dia em que a luz natural média do ambiente já atinge o nível geral recomendado (veja a tabela de lâmpadas), e as luzes podem ficar apagadas.

Quase nunca 1/5	abaixo de 10 % das horas entre 8h e 18h	Você vai acender as luzes o dia todo.
Raramente 2/5	10 a 25 % das horas entre 8h e 18h	Lâmpadas necessárias na maior parte do dia.
Às vezes 3/5	25 a 50 % das horas entre 8h e 18h	Lâmpadas necessárias em dias nublados e de manhã / à tarde.
Frequentemente 4/5	50 a 75 % das horas entre 8h e 18h	Lâmpadas quase sempre apagadas de dia.
Quase sempre 5/5	75 ou mais % das horas entre 8h e 18h	Lâmpadas apagadas quase o dia inteiro.

Esta casa: Sala de estar (frente) 47% Às vezes 3/5 | TV / jantar (fundos) 96% Quase sempre 5/5 | Corredor 0% Quase nunca 1/5 | Quarto 1 96% Quase sempre 5/5 | Banheiro 1 1% Quase nunca 1/5 | Quarto 2 40% Às vezes 3/5 | Banheiro 2 0% Quase nunca 1/5 | Quarto 3 70% Frequentemente 4/5 | Cozinha 81% Quase sempre 5/5 | Banheiro externo 14% Raramente 2/5 | Depósito externo 78% Quase sempre 5/5

Fonte: Regra prática deste estudo (nenhuma norma dá um número); ABNT NBR 5413:1992 (cancelada em 2013, mas ainda a referência brasileira mais usada para iluminação de RESIDÊNCIAS).

Sol direto na janela no início da primavera Padrão internacional

Horas de sol direto que chegam às janelas do ambiente em um dia típico do início da primavera: 1º de agosto a 21 de setembro no hemisfério sul, 1º de fevereiro a 21 de março no norte (as datas da EN 17037). Sol no inverno e no início da primavera faz bem à saúde e aquece.

Abaixo do mínimo 2/5	abaixo de 1,5 horas/dia	Menos de 1,5 h de sol: o ambiente parece sem sol.
Mínimo 3/5	1,5 a 3 horas/dia	Atende ao mínimo da EN 17037 (1,5 h).
Médio 4/5	3 a 4 horas/dia	Atende ao nível médio da EN 17037 (3 h).
Alto 5/5	4 ou mais horas/dia	Atende ao nível alto da EN 17037 (4 h).

Esta casa: Sala de estar (frente) 0,0 h Abaixo do mínimo 2/5 | TV / jantar (fundos) 0,3 h Abaixo do mínimo 2/5 | Quarto 1 3,7 h Médio 4/5 | Quarto 2 0,0 h Abaixo do mínimo 2/5 | Quarto 3 0,0 h Abaixo do mínimo 2/5 | Cozinha 0,0 h Abaixo do mínimo 2/5

Fonte: EN 17037:2018 Iluminação natural em edifícios (Anexo Nacional do Reino Unido para moradias: 100/150/200 lx; insolação 1,5/3/4 h). A EN 17037 pede isso para pelo menos um cômodo principal (de preferência a sala); banheiros e corredores são isentos.

3. Lâmpadas: quanta luz instalar (lumens)

Lux é a luz que chega a uma superfície; **lumens** é a luz que uma lâmpada emite. Para ter uma média de X lux em um piso de A m² você precisa de $X \times A \div (utilização \times manutenção = 0,45 \times 0,8 = 0,36)$ lumens. A coluna “mínimo” é só lux $\times m^2$.

3,1 Níveis de luz recomendados em casa

Tipo de ambiente	Luz geral (lux): mín / recomendado / máx	Luz de tarefa (lux)	Fonte
Sala de estar / jantar	100 / 150 / 200	300 / 500 / 750 - leitura, escrita, costura	NBR 5413 (residências); EN 12464-1 / NBR 8995-1 para tarefas de leitura
Dormitório	100 / 150 / 200	200 / 300 / 500 - leitura na cama, penteadeira	NBR 5413 (residências)
Cozinha	100 / 150 / 200	200 / 300 / 500 - fogão, pia e bancada (a EN 12464-1 pede 500)	NBR 5413 (residências); EN 12464-1
Banheiro	100 / 150 / 200	200 / 300 / 500 - espelho (barba, maquiagem)	NBR 5413 (residências)
Corredor / circulação	75 / 100 / 150	-	NBR 5413 (residências)
Lavanderia / depósito / banheiro externo	100 / 150 / 200	200 / 300 / 500 - lavanderia e ferramentas	NBR 5413 (residências)
Varanda / garagem (área externa coberta)	50 / 75 / 100	-	NBR 5413 (garagens 50-75-100)

Calculado com: **Modelo 3D (IFC) e tabelas** - tabelas de norma, sem cálculo - detalhes e confiabilidade na seção 9

Leitura: ilumine o ambiente no nível geral (100-200 lux) e acrescente uma **luminária de leitura direcional de cerca de 450-800 lumens** (cerca de 4-8 W de LED) perto da página para chegar a **300-500 lux** nela (NBR ISO/CIE 8995-1 e EN 12464-1 para leitura e escrita; NBR 5413 para residências). Ler só com os 100-150 lux da luz geral cansa a vista. Para ter noção: 100 lm = luz noturna / lâmpada vela pequena; 450 lm = equivalente a uma lâmpada incandescente de 40 W; 800 lm = equivalente a uma lâmpada incandescente de 60 W; 1600 lm = equivalente a uma lâmpada incandescente de 100 W.

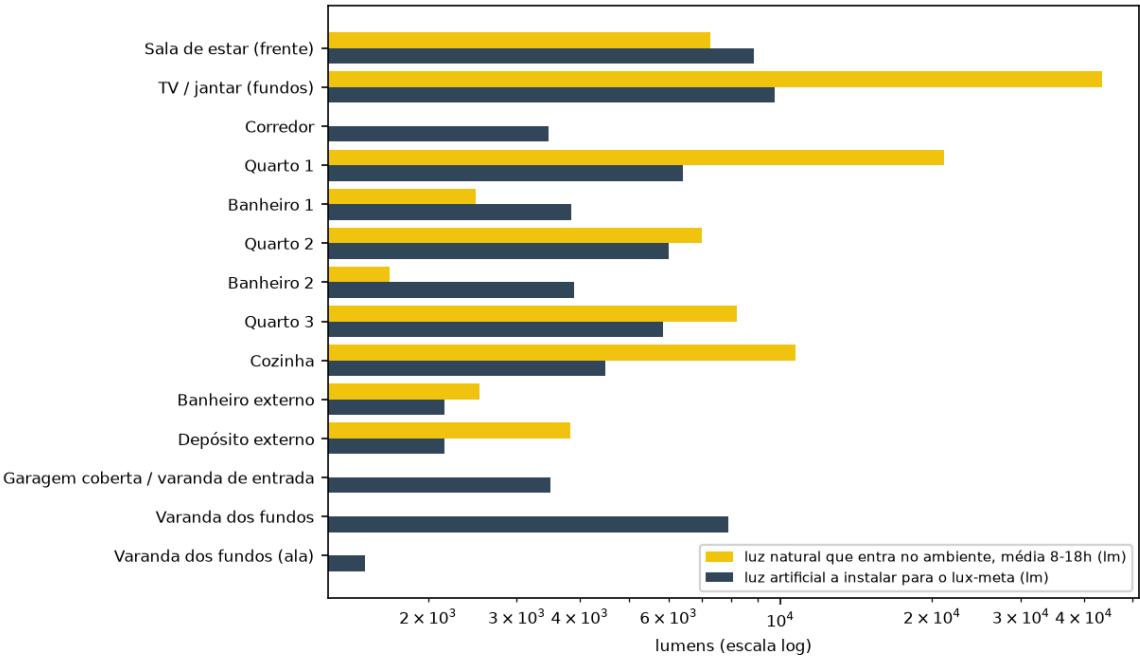
3,2 Lumens de lâmpada para cada ambiente desta casa

Ambiente	m²	Meta de luz geral	Luz de tarefa (leitura etc.)	Lumens das lâmpadas: mínimo - projeto	Watts de LED (projeto)
Sala de estar (frente)	21,2	150 lux	500 lux (leitura, escrita, costura)	3.186 - 8.850	88
TV / jantar (fundos)	23,4	150 lux	500 lux (leitura, escrita, costura)	3.510 - 9.750	98
Corredor	12,5	100 lux	-	1.248 - 3.467	35
Quarto 1	15,4	150 lux	300 lux (leitura na cama, penteadeira)	2.310 - 6.417	64
Banheiro 1	9,2	150 lux	300 lux (espelho (barba, maquiagem))	1.386 - 3.850	38
Quarto 2	14,4	150 lux	300 lux (leitura na cama, penteadeira)	2.160 - 6.000	60
Banheiro 2	9,4	150 lux	300 lux (espelho (barba, maquiagem))	1.404 - 3.900	39
Quarto 3	14,1	150 lux	300 lux (leitura na cama, penteadeira)	2.109 - 5.858	59
Cozinha	10,8	150 lux	300 lux (fogão, pia e bancada (a EN 12464-1 pede 500))	1.620 - 4.500	45
Banheiro externo	5,2	150 lux	300 lux (lavanderia e ferramentas)	778 - 2.160	22
Depósito externo	5,2	150 lux	300 lux (lavanderia e ferramentas)	778 - 2.160	22

Calculado com: **Motor rápido (Python, deste projeto)** - detalhes e confiabilidade na seção 9

Use o extremo inferior para paredes e tetos claros e boas luminárias; o superior para cores escuras ou spots embutidos. LED a 100 lm por watt. A luz natural já cobre parte do dia (seção 2,2).

Lumens por ambiente: luz natural pelas janelas x lâmpadas necessárias (método dos lumens, UF 0,4



Luz natural que entra pelas janelas (amarelo) comparada com os lumens de lâmpada necessários para a luz-meta (escuro).

4. Janelas, ar fresco e vento

A NBR 15575-4 pede que a parte abrível das janelas seja de pelo menos **7% da área do piso** de cada sala e dormitório, e limita o vidro a 20% do piso, salvo se houver sombreamento. A NBR 15220-3 recomenda a ventilação cruzada pelo vento como principal estratégia de verão para este clima.

4,1 Tamanho das janelas

Ambiente	Piso m²	Vidro m²	Vidro / piso	Abrível / piso
Sala de estar + jantar	44,6	6,64	14,9% Pequena 3/5	7,4% Atende ao mínimo 3/5
Corredor	12,5	0,00	0,0%	0,0%
Quarto 1	15,4	1,44	9,4% Pequena 3/5	4,7% Não atende 1/5
Banheiro 1	9,2	0,36	3,9%	1,9%
Quarto 2	14,4	1,44	10,0% Pequena 3/5	5,0% Não atende 1/5
Banheiro 2	9,4	0,36	3,8%	1,9%
Quarto 3	14,1	1,44	10,2% Pequena 3/5	5,1% Não atende 1/5
Cozinha	10,8	1,80	16,7% Ideal 5/5	8,3% Atende ao mínimo 3/5
Banheiro externo	5,2	0,36	6,9%	3,5%
Depósito externo	5,2	0,36	6,9%	3,5%

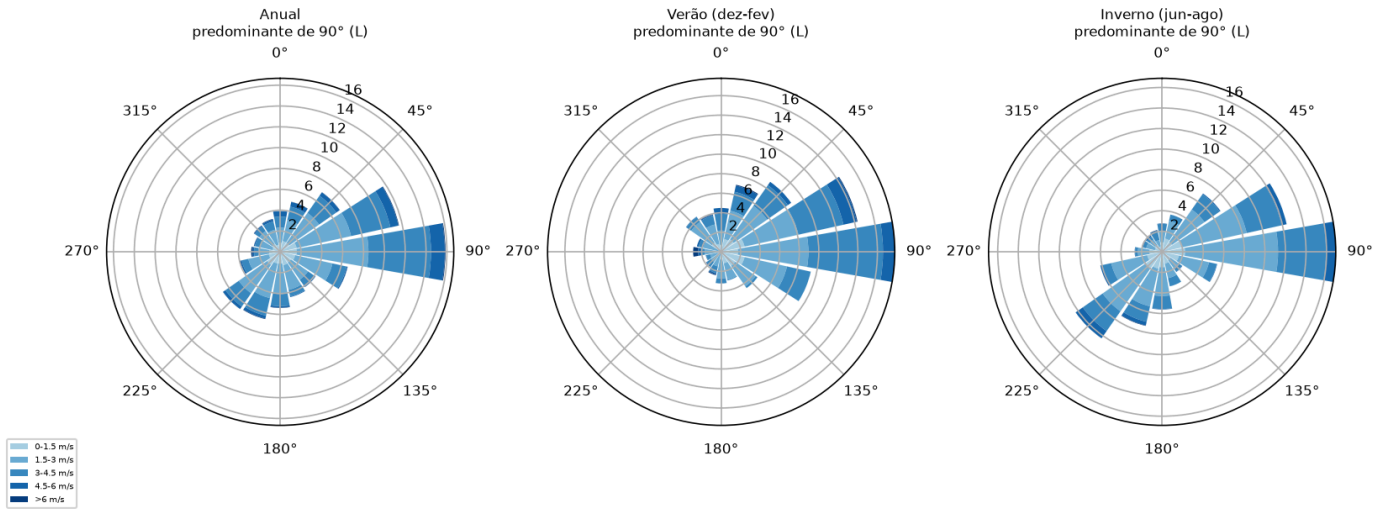
Calculado com: **Modelo 3D (IFC) e tabelas** · tamanhos lidos do modelo IFC · detalhes e confiabilidade na seção 9

Os tamanhos de janela do modelo são medidas comuns de catálogo por volta de 2012 (dormitórios 1,20 x 1,20 m, sala de estar e jantar 2,00 x 1,20 m, cozinha 1,50 x 1,20 m, banheiros 0,60 x 0,60 m), não medições; supõe-se que uma janela de correr abre metade da sua área. Se as janelas reais forem diferentes, altere-as e rode a análise de novo.

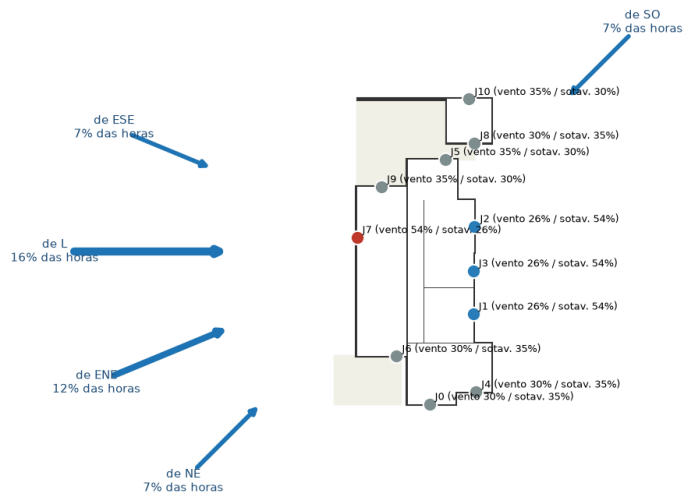
4,2 Ventilação cruzada

Ambiente	Horas com vento e corrente de ar atravessando
Sala de estar + jantar	100% Excelente 5/5
Corredor	100%
Quarto 1	100% Excelente 5/5
Banheiro 1	0%
Quarto 2	100% Excelente 5/5
Banheiro 2	0%
Quarto 3	100% Excelente 5/5
Cozinha	100% Excelente 5/5
Banheiro externo	0%
Depósito externo	0%

Calculado com: **Motor rápido (Python, deste projeto)** · regra de horas de vento do arquivo climático; sem cálculo de pressão (a ventilação por pressão está na seção 6,4) · detalhes e confiabilidade na seção 9



De onde vem o vento e quais janelas ficam de frente para ele
(direções reais; rua / norte embaixo; comprimento da seta ~ frequência)



vermelho = de frente para o vento em > 40% das horas com vento azul = a sotavento em > 40% cinza = lateral na maior parte

Direções do vento em relação às janelas da casa (janelas vermelhas de frente para o vento, azuis do lado protegido).

O que conta como bom? (janelas e vento)

Área de janela abrível para ventilação Norma brasileira

Área das janelas que realmente abre (descontados vidros, caixilhos e folhas fixas) dividida pela área do piso do ambiente. Nas zonas 1 a 7 é exigido pelo menos 7%.

Não atende 1/5	abaixo de 7 % da área do piso	Menos que os 7% mínimos da norma (a menos que o código de obras do município diga outra coisa).
Atende ao mínimo 3/5	7 a 10 % da área do piso	Atende ao mínimo de 7%.
Boa margem 5/5	10 ou mais % da área do piso	Mais que o mínimo: boas trocas de ar.

Esta casa: Sala de estar + jantar 7,4% **Atende ao mínimo 3/5** | Quarto 1 4,7% **Não atende 1/5** | Quarto 2 5,0% **Não atende 1/5** | Quarto 3 5,1% **Não atende 1/5** | Cozinha 8,3%
Atende ao mínimo 3/5

Fonte: Projeto de emenda da ABNT NBR 15575-4:2021 (mar/2021): método simplificado para paredes, ventilação e áreas transparentes. Supomos que uma janela de correr abre cerca da metade da sua área; janelas de abrir ou basculantes abrem mais.

Área de vidro em relação ao piso Norma brasileira

Área da janela dividida pela área do piso. A NBR 15575-4 limita as áreas transparentes a 20% do piso (ambientes até 20 m²) a menos que haja sombreamento ou vidro de alto desempenho; a NBR 15220-3 recomenda aberturas de 15 a 25% na zona 3.

Muito pequena 2/5	abaixo de 7 % da área do piso	Janela pequena demais para luz e ar.
Pequena 3/5	7 a 15 % da área do piso	Funciona, mas um pouco escuro ou abafado.
Ideal 5/5	15 a 20 % da área do piso	Dentro do limite da NBR 15575-4 e da recomendação da NBR 15220-3.
Grande 4/5	20 a 25 % da área do piso	Recomendada pela NBR 15220-3 se sombreada; acima dos 20% da NBR 15575-4, exceto se sombreada.
Grande demais 2/5	25 ou mais % da área do piso	Mais calor do sol do que as normas aceitam sem sombreamento.

Esta casa: Sala de estar + jantar 14,9% **Pequena 3/5** | Quarto 1 9,4% **Pequena 3/5** | Quarto 2 10,0% **Pequena 3/5** | Quarto 3 10,2% **Pequena 3/5** | Cozinha 16,7% **Ideal 5/5**

Fonte: Projeto de emenda da ABNT NBR 15575-4:2021 (mar/2021): método simplificado para paredes, ventilação e áreas transparentes; ABNT NBR 15220-3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas (Maringá costuma ser listada na zona 3).

Ventilação cruzada possível Regra prática

Parcela das horas com vento em que o vento bate em uma janela de um lado dos ambientes conectados e outra janela do lado oposto deixa o ar sair (portas supostas abertas).

Quase nenhuma 1/5	abaixo de 5 % das horas com vento	O ar quase não atravessa o ambiente.
Fraca 2/5	5 a 20 % das horas com vento	A ventilação cruzada raramente acontece.
Alguma 3/5	20 a 40 % das horas com vento	Funciona em parte das horas com vento.
Boa 4/5	40 a 60 % das horas com vento	Funciona em muitas horas com vento.
Excelente 5/5	60 ou mais % das horas com vento	Uma corrente de ar atravessando a casa é possível quase sempre.

Esta casa: Sala de estar + jantar 100% Excelente 5/5 | Quarto 1 100% Excelente 5/5 | Quarto 2 100% Excelente 5/5 | Quarto 3 100% Excelente 5/5 | Cozinha 100% Excelente 5/5

Fonte: Regra prática deste estudo (nenhuma norma dá um número).

Velocidade média do vento externo Padrão internacional

Vento médio no local ao longo do ano (arquivo climático, terreno aberto a 10 m; na casa é menor).

Calmaria 2/5	abaixo de 1,0 m/s	Pouca ventilação natural só pelo vento.
Aragem 3/5	1,0 a 2,0 m/s	Suave; as aberturas ajudam, mas a ventilação cruzada é fraca.
Brisa leve a suave 5/5	2,0 a 5,0 m/s	Faixa ideal para ventilação natural.
Brisa moderada 4/5	5,0 a 8,0 m/s	Forte o bastante para exigir proteção contra o vento ao ar livre.
Brisa fresca ou mais 2/5	8,0 ou mais m/s	Risco de danos e desconforto pelo vento.

Esta casa: Maringá, PR, ano todo 2,3 m/s Brisa leve a suave 5/5

Fonte: Escala de vento Beaufort (OMM); Regra prática deste estudo (nenhuma norma dá um número). Beaufort 1 = 0,3–1,5 m/s, 2 = 1,6–3,3, 3 = 3,4–5,4, 4 = 5,5–7,9 m/s. Dentro de casa, a ASHRAE 55 aceita velocidades do ar de até cerca de 0,8 m/s.

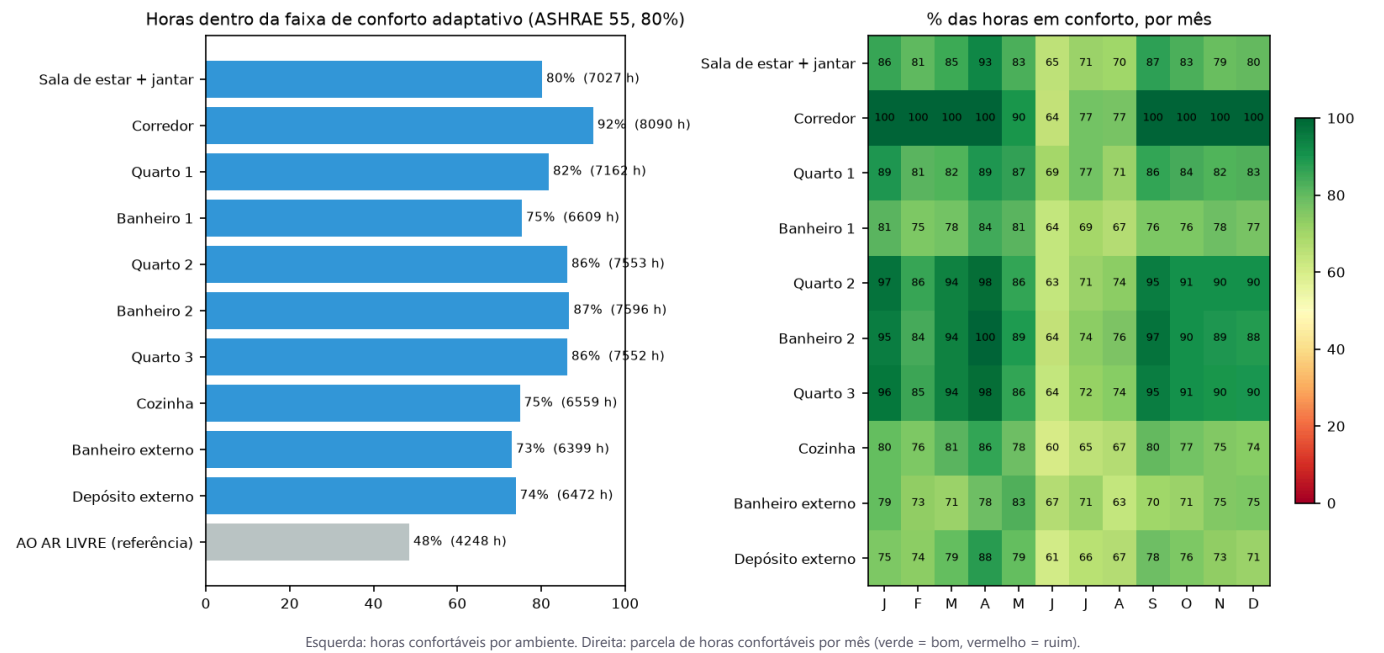
5. Temperatura e conforto

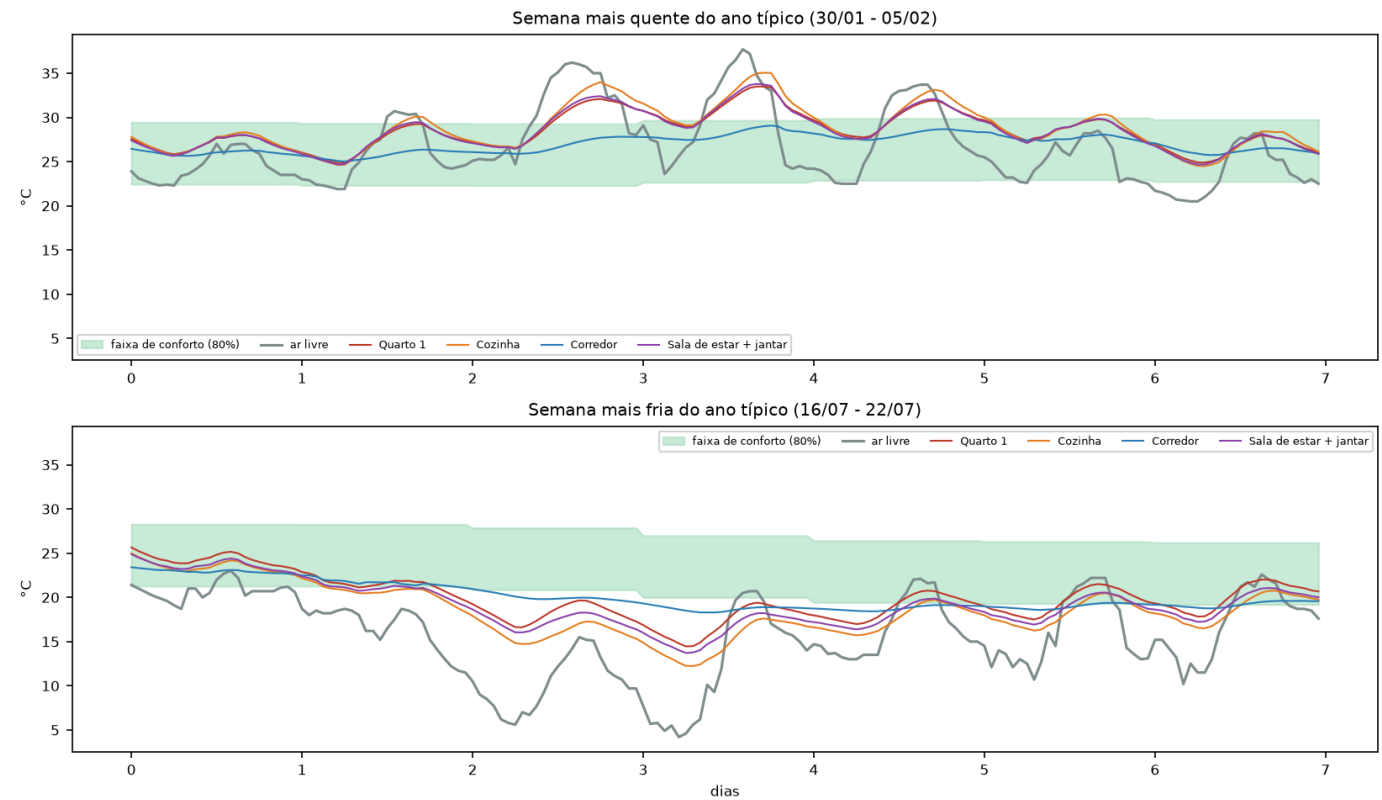
Sem ar-condicionado, o conforto depende das paredes, da cobertura, das janelas, da sombra e da ventilação. A simulação calcula a temperatura interna de cada ambiente para cada uma das 8,760 horas de um ano típico. **Confortável** significa dentro da faixa de conforto adaptativo da ASHRAE 55 (ela acompanha o clima: as pessoas aceitam ambientes mais quentes quando faz mais calor lá fora).

5,1 Horas na faixa confortável

Ambiente	Horas confortáveis	Quente demais	Frio demais	Máxima	Mínima
Sala de estar + jantar	7.027 h = 80% Bom 4/5	842 h	891 h	33,8 °C Muito quente 2/5	12,8 °C Frio 2/5
Corredor	8.090 h = 92% Excelente 5/5	0 h	670 h	29,1 °C Morno 4/5	16,5 °C Fresco 3/5
Quarto 1	7.162 h = 82% Bom 4/5	875 h	723 h	33,5 °C Muito quente 2/5	13,0 °C Frio 2/5
Banheiro 1	6.609 h = 75% Bom 4/5	1.223 h	928 h	34,9 °C Muito quente 2/5	11,7 °C Perigoso 1/5
Quarto 2	7.553 h = 86% Bom 4/5	402 h	805 h	32,8 °C Muito quente 2/5	14,0 °C Frio 2/5
Banheiro 2	7.596 h = 87% Bom 4/5	450 h	714 h	32,5 °C Muito quente 2/5	14,4 °C Frio 2/5
Quarto 3	7.552 h = 86% Bom 4/5	409 h	799 h	32,8 °C Muito quente 2/5	14,0 °C Frio 2/5
Cozinha	6.559 h = 75% Aceitável 3/5	1.109 h	1.092 h	35,1 °C Extremo 1/5	11,5 °C Perigoso 1/5
Banheiro externo	6.399 h = 73% Aceitável 3/5	1.546 h	815 h	35,1 °C Extremo 1/5	11,5 °C Perigoso 1/5
Depósito externo	6.472 h = 74% Aceitável 3/5	1.258 h	1.030 h	35,1 °C Extremo 1/5	11,3 °C Perigoso 1/5
AO AR LIVRE (referência)	4.248 h = 48% Ruim 2/5	1.193 h	3.319 h	37,7 °C	4,2 °C

Calculado com: **Motor rápido (Python, deste projeto)** - detalhes e confiabilidade na seção 9





Uma semana quente e uma semana fria: temperaturas internas contra a faixa de conforto e a temperatura externa.

5,2 Verificação brasileira de dia de projeto (NBR 15575)

Dia mais quente do ano típico: **02 Fev** (37,7 °C lá fora). Dia mais frio: **19 Jul** (4,2 °C lá fora).

Ambiente	Dia mais quente: máxima interna	vs. externo	Veredito	Dia mais frio: mínima interna	vs. externo	Veredito
Sala de estar + jantar	33,9 °C	-3,8	Intermediário 4/5	13,5 °C	+9,3	Superior 5/5
Corredor (não avaliado)	29,0 °C	-8,7		18,3 °C	+14,1	
Quarto 1	33,6 °C	-4,1	Superior 5/5	14,3 °C	+10,1	Superior 5/5
Banheiro 1 (não avaliado)	35,0 °C	-2,7		12,4 °C	+8,2	
Quarto 2	32,8 °C	-4,9	Superior 5/5	14,9 °C	+10,7	Superior 5/5
Banheiro 2 (não avaliado)	32,5 °C	-5,2		15,6 °C	+11,4	
Quarto 3	32,8 °C	-4,9	Superior 5/5	15,0 °C	+10,8	Superior 5/5
Cozinha (não avaliado)	35,1 °C	-2,6		12,0 °C	+7,8	
Banheiro externo (não avaliado)	35,1 °C	-2,6		12,6 °C	+8,4	
Depósito externo (não avaliado)	35,2 °C	-2,5		11,9 °C	+7,7	

Calculado com: **Motor rápido (Python, deste projeto)** - detalhes e confiabilidade na seção 9

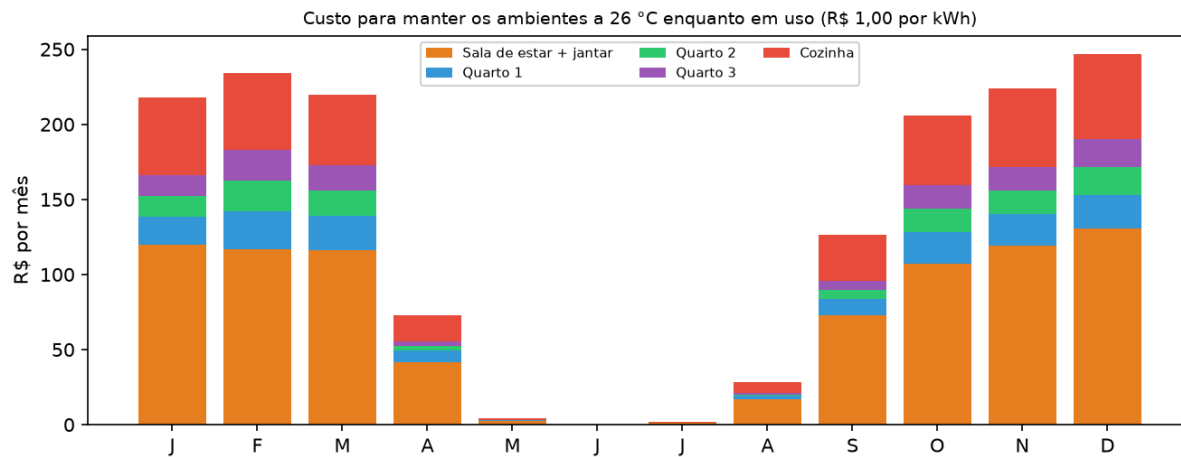
A edição mais nova (NBR 15575-1:2021) compara a casa com uma casa de referência ao longo do ano todo; isso exige uma segunda simulação, por isso este relatório usa os critérios absolutos clássicos de dia de projeto, que são mais fáceis de entender.

5,3 Quanto custa refrigerar os ambientes no verão

Se um ambiente esquentar demais, dá para refrigerá-lo com ar-condicionado. A simulação liga um split sempre que o ambiente passa de **26 °C** nas horas em que é usado (dormitórios: 21:00-08:00, sala: 14:00-23:00, cozinha: 08:00-21:00), com as janelas fechadas, e soma a eletricidade: calor retirado ÷ COP 3,0 (um modelo inverter faz melhor) × tarifa de **R\$ 1,00 por kWh** (com todos os impostos; uma suposição baseada na tarifa residencial da Copel após o reajuste de +20% de junho de 2026; altere com `run_all.bat --tariff 0,95`).

Calculado com: **Motor rápido (Python, deste projeto)** - detalhes e confiabilidade na seção 9

Ambiente	Quando é climatizado	Horas com o ar ligado	Eletricidade kWh/ano	Custo R\$/ano	Custo dez-fev	Pior mês	Pico de calor a retirar	Capacidade do ar	Nível
Sala de estar + jantar (44,6 m²)	14:00-23:00	1627	844	R\$ 844	R\$ 367	Dez (R\$ 131)	5,8 kW	24.000 BTU/h	Baixa 4/5
Quarto 1 (15,4 m²)	21:00-08:00	975	153	R\$ 153	R\$ 66	Fev (R\$ 25)	1,9 kW	9.000 BTU/h	Muito baixa 5/5
Quarto 2 (14,4 m²)	21:00-08:00	875	112	R\$ 112	R\$ 53	Fev (R\$ 21)	1,6 kW	9.000 BTU/h	Muito baixa 5/5
Quarto 3 (14,1 m²)	21:00-08:00	887	110	R\$ 110	R\$ 53	Fev (R\$ 20)	1,6 kW	9.000 BTU/h	Muito baixa 5/5
Cozinha (10,8 m²)	08:00-21:00	2157	363	R\$ 363	R\$ 160	Dez (R\$ 57)	1,5 kW	9.000 BTU/h	Moderada 3/5
Total			1.582	R\$ 1.582					



Custo mensal de climatização por ambiente.

"Pico de calor a retirar" é a potência de refrigeração necessária na hora mais quente; a capacidade do ar soma 10% e arredonda para um tamanho de catálogo (1 kW = 3,412 BTU/h). Só o calor sensível é contado (sem desumidificação), então as contas reais são um pouco maiores. Os ambientes com nível Alta ou Muito alta são onde sombra, uma cobertura melhor ou melhor isolamento se pagam mais rápido.

O que conta como bom? (temperatura, refrigeração e aquecimento)

Horas na faixa de temperatura confortável Regra prática

Parcela das 8,760 horas do ano em que a temperatura do ambiente fica dentro da faixa de conforto adaptativo da ASHRAE 55 (ela acompanha o clima: com mais calor lá fora, aceita-se mais calor dentro). Ao ar livre, como referência, só cerca de metade das horas.

Péssimo 1/5	abaixo de 40 % do ano	Desconfortável na maior parte do ano.
Ruim 2/5	40 a 60 % do ano	Desconfortável em boa parte do ano.
Aceitável 3/5	60 a 75 % do ano	Confortável na maior parte do tempo, com algumas ondas de calor ou frio.
Bom 4/5	75 a 90 % do ano	Confortável na maior parte do ano.
Excelente 5/5	90 ou mais % do ano	Confortável quase o ano todo sem ar-condicionado nem aquecimento.

Esta casa: Sala de estar + jantar 80% **Bom 4/5** | Corredor 92% **Excelente 5/5** | Quarto 1 82% **Bom 4/5** | Banheiro 1 75% **Bom 4/5** | Quarto 2 86% **Bom 4/5** | Banheiro 2 87% **Bom 4/5** | Quarto 3 86% **Bom 4/5** | Cozinha 75% **Aceitável 3/5** | Banheiro externo 73% **Aceitável 3/5** | Depósito externo 74% **Aceitável 3/5** | AO AR LIVRE (referência) 48% **Ruim 2/5**

Fonte: ASHRAE 55, modelo de conforto adaptativo (aceitabilidade de 80% / 90%); Regra prática deste estudo (nenhuma norma dá um número). As normas avaliam o conforto térmico em relação a uma casa de referência ou em dias de projeto; esta escala em porcentagem é nossa.

Dia mais quente: máxima interna x máxima externa (NBR 15575) Norma brasileira

No dia mais quente do ano típico, a maior temperatura do ar interno comparada com a maior temperatura externa. Negativo significa que a casa fica mais fresca que o lado de fora.

Superior 5/5	abaixo de -4 °C (máx. interna – máx. externa)	Máxima interna pelo menos 4 °C abaixo da externa.
Intermediário 4/5	-4 a -2 °C (máx. interna – máx. externa)	Máxima interna pelo menos 2 °C abaixo da externa.
Mínimo 3/5	-2 a 0,0001 °C (máx. interna – máx. externa)	Máxima interna não maior que a externa.
Não atende 1/5	0,0001 ou mais °C (máx. interna – máx. externa)	Máxima interna maior que a externa: a casa superaquece.

Esta casa: Sala de estar + jantar -3,8 °C **Intermediário 4/5** | Quarto 1 -4,1 °C **Superior 5/5** | Quarto 2 -4,9 °C **Superior 5/5** | Quarto 3 -4,9 °C **Superior 5/5**

Fonte: ABNT NBR 15575-1:2013 (Edificações habitacionais — Desempenho), requisitos de iluminação natural e desempenho térmico. Vale para dormitórios e salas. Usamos o dia mais quente do arquivo climático, não o dia típico de projeto da norma.

Dia mais frio: mínima interna x mínima externa (NBR 15575) Norma brasileira

No dia mais frio do ano típico, a menor temperatura do ar interno comparada com a menor temperatura externa. Positivo significa que a casa fica mais quente que o lado de fora.

Não atende 1/5	abaixo de 3 °C (mín. interna – mín. externa)	Menos de 3 °C mais quente que o lado de fora.
Mínimo 3/5	3 a 5 °C (mín. interna – mín. externa)	Pelo menos 3 °C mais quente que o lado de fora.
Intermediário 4/5	5 a 7 °C (mín. interna – mín. externa)	Pelo menos 5 °C mais quente que o lado de fora.
Superior 5/5	7 ou mais °C (mín. interna – mín. externa)	Pelo menos 7 °C mais quente que o lado de fora.

Esta casa: Sala de estar + jantar +9,3 °C **Superior 5/5** | Quarto 1 +10,1 °C **Superior 5/5** | Quarto 2 +10,7 °C **Superior 5/5** | Quarto 3 +10,8 °C **Superior 5/5**

Fonte: ABNT NBR 15575-1:2013 (Edificações habitacionais — Desempenho), requisitos de iluminação natural e desempenho térmico. A verificação de inverno é exigida nas zonas bioclimáticas 1 a 5, o que inclui Maringá.

Hora mais quente do ano dentro de casa Regra prática

Maior temperatura operativa (ar + superfícies das paredes) atingida no ambiente.

Confortável 5/5	abaixo de 28 °C	Nunca fica realmente quente.
Morno 4/5	28 a 30 °C	Quente nos dias mais quentes; um ventilador resolve.
Quente 3/5	30 a 32 °C	Períodos quentes; ventilador ajuda, o sono é afetado.
Muito quente 2/5	32 a 35 °C	Risco de estresse térmico para crianças e idosos.
Extremo 1/5	35 ou mais °C	Perigoso sem climatização.

Esta casa: Sala de estar + jantar 33,8 °C **Muito quente 2/5** | Corredor 29,1 °C **Morno 4/5** | Quarto 1 33,5 °C **Muito quente 2/5** | Banheiro 1 34,9 °C **Muito quente 2/5** | Quarto 2 32,8 °C **Muito quente 2/5** | Banheiro 2 32,5 °C **Muito quente 2/5** | Quarto 3 32,8 °C **Muito quente 2/5** | Cozinha 35,1 °C **Extremo 1/5** | Banheiro externo 35,1 °C **Extremo 1/5** | Depósito externo 35,1 °C **Extremo 1/5**

Fonte: ASHRAE 55, modelo de conforto adaptativo (aceitabilidade de 80% / 90%); Regra prática deste estudo (nenhuma norma dá um número). O limite superior do conforto adaptativo em um mês quente é cerca de 29 °C (aceitabilidade de 80%).

Hora mais fria do ano dentro de casa Padrão internacional

Menor temperatura operativa atingida no ambiente.

Perigoso 1/5	abaixo de 12 °C	Estresse por frio; risco de problemas cardíacos e respiratórios.
Frio 2/5	12 a 16 °C	Abaixo de 16 °C o risco de problemas respiratórios aumenta.
Fresco 3/5	16 a 18 °C	Precisa de agasalho; abaixo dos 18 °C recomendados pela OMS.
Bom 4/5	18 a 20 °C	Atende à recomendação da OMS de pelo menos 18 °C.
Agradável 5/5	20 ou mais °C	Nunca fica desconfortavelmente frio.

Esta casa: Sala de estar + jantar 12,8 °C Frio 2/5 | Corredor 16,5 °C Fresco 3/5 | Quarto 1 13,0 °C Frio 2/5 | Banheiro 1 11,7 °C Perigoso 1/5 | Quarto 2 14,0 °C Frio 2/5 | Banheiro 2 14,4 °C Frio 2/5 | Quarto 3 14,0 °C Frio 2/5 | Cozinha 11,5 °C Perigoso 1/5 | Banheiro externo 11,5 °C Perigoso 1/5 | Depósito externo 11,3 °C Perigoso 1/5

Fonte: OMS, Diretrizes de Habitação e Saúde 2018 (temperatura interna de pelo menos 18 °C).

Eletricidade para manter o ambiente fresco com ar-condicionado Regra prática

Eletricidade que um split usaria em um ano para manter o ambiente a 26 °C (limite superior da zona de conforto de verão da NBR 16401-2) nas horas em que ele é usado (dormitórios 21h–8h, sala 14h–23h, cozinha 8h–21h). Um ambiente que superaquece no verão custa mais aqui. Custo = kWh × tarifa.

Muito baixa 5/5	abaixo de 10 kWh por m² por ano	Raramente precisa de refrigeração.
Baixa 4/5	10 a 25 kWh por m² por ano	Algumas semanas de refrigeração por ano.
Moderada 3/5	25 a 45 kWh por m² por ano	Refrigeração necessária na maior parte do verão.
Alta 2/5	45 a 70 kWh por m² por ano	Caro para manter fresco: o ambiente superaquece muito.
Muito alta 1/5	70 ou mais kWh por m² por ano	Muito caro: sombreamento, isolamento ou uma cobertura melhor valem mais que um ar-condicionado maior.

Esta casa: Sala de estar + jantar 18,9 kWh/m² Baixa 4/5 | Quarto 1 9,9 kWh/m² Muito baixa 5/5 | Quarto 2 7,7 kWh/m² Muito baixa 5/5 | Quarto 3 7,8 kWh/m² Muito baixa 5/5 | Cozinha 33,6 kWh/m² Moderada 3/5

Fonte: Regra prática deste estudo (nenhuma norma dá um número); ABNT NBR 16401-2 (ar-condicionado, conforto interno): verão cerca de 22,5–25,5 °C com 65% de UR e 23–26 °C com 35% de UR. Considera COP 3,0 (split classe A do Inmetro de cerca de 2012), janelas fechadas com o ar ligado e só calor sensível (sem desumidificação); portanto as contas reais são um pouco maiores. A tarifa é uma suposição; veja o relatório.

6. Sol por fora, paredes e cobertura

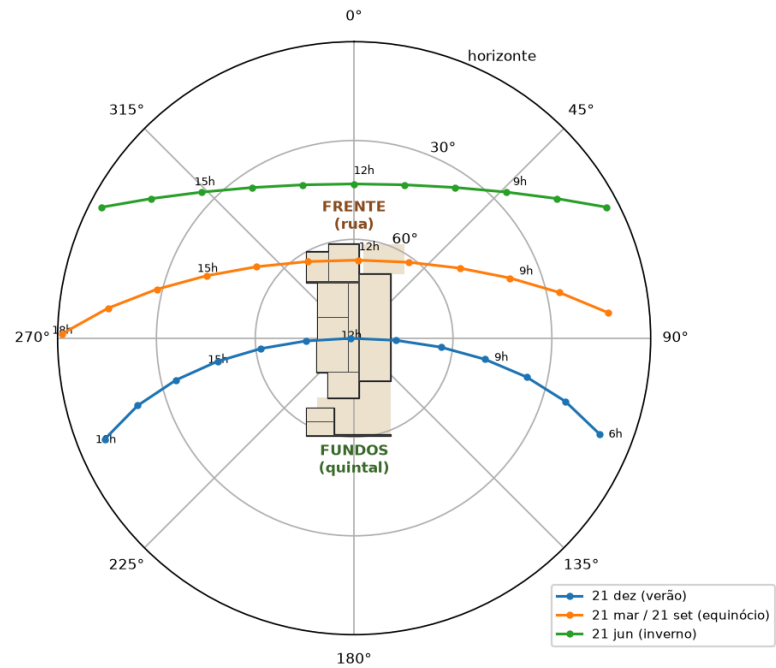
Nesta latitude o sol do meio-dia fica sempre na metade norte do céu, então as paredes voltadas para o norte recebem o sol de inverno (bom) e pouco sol de verão, enquanto as paredes leste e oeste recebem muito sol de verão (ruim).

6,1 Energia solar em cada superfície (kWh por m², sem sombra)

Superfície	Ano todo	Verão (dez-fev)	Inverno (jun-ago)
Parede norte	1066	155 Moderado 4/5	356 Alto 5/5
Parede leste	1004	287 Alto 3/5	204 Moderado 3/5
Parede sul	507	179 Moderado 4/5	86 Baixo 2/5
Parede oeste	982	279 Alto 3/5	191 Moderado 3/5
Cobertura (horizontal)	1865	536	351

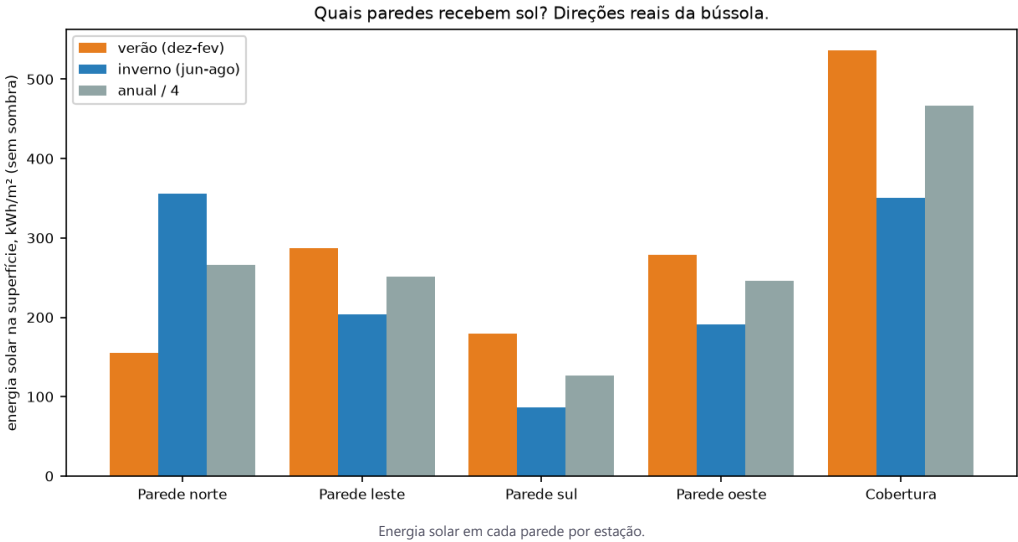
Calculado com: Motor rápido (Python, deste projeto) - detalhes e confiabilidade na seção 9

Trajatória do sol - Maringá, PR (lat -23.4°): ao meio-dia o sol está sempre na metade norte do céu



A planta da casa está desenhada no centro, na orientação real; o tamanho dela não está em escala com os ângulos do céu.

Trajetória do sol ao longo do ano com a casa desenhada no centro, na orientação real: a frente (rua) é voltada para o norte e os fundos para o sul.



6,2 As paredes e a cobertura atendem à NBR 15575?

Item	Esta casa	Limite (NBR 15575)	Resultado
Transmitância térmica U da parede externa Bloco cerâmico furado de 8 furos 9x19x19 cm + 2 cm de reboco nos dois lados = parede de 13 cm (bloco padrão brasileiro) (absortância da pintura / cobertura 0,45)	2,52 W/m²K	<= 3,7	atende
Capacidade térmica da parede externa Bloco cerâmico furado de 8 furos 9x19x19 cm + 2 cm de reboco nos dois lados = parede de 13 cm (bloco padrão brasileiro) (absortância da pintura / cobertura 0,45)	134 kJ/m²K	>= 130	atende
Transmitância térmica U da cobertura (indicativa) Telha cerâmica + sótão ventilado + laje de concreto de 12 cm (absortância da pintura / cobertura 0,7)	1,78 W/m²K	<= 1,5	não atende

Calculado com: Motor rápido (Python, deste projeto) - detalhes e confiabilidade na seção 9

6,3 E se os materiais mudarem?

Calculado com: **Motor rápido (Python, deste projeto)** - detalhes e confiabilidade na seção 9

Numa casa pronta é muito difícil trocar as paredes, mas a cobertura muitas vezes pode ser melhorada; por isso as duas são mostradas separadamente (cada uma com a outra parte mantida como é hoje). Melhorias de cobertura, como lâ isolante, estão na seção 7.

Paredes

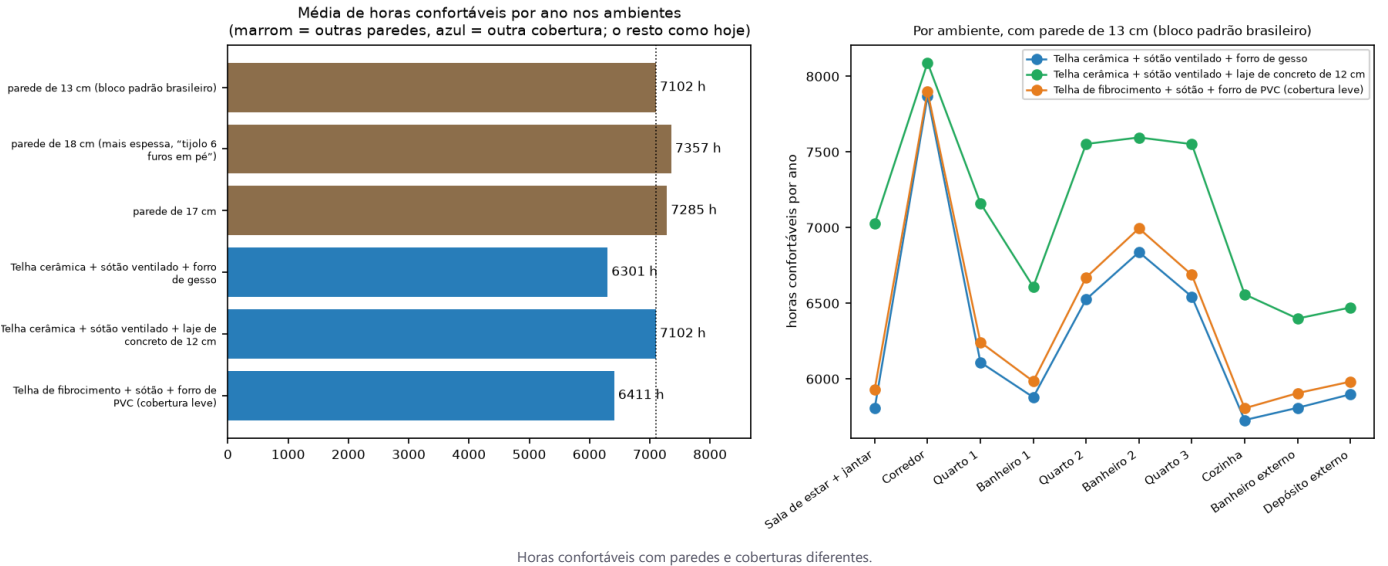
Cobertura mantida: Clay tile + ventilated attic + 12 cm concrete slab ceiling

Paredes	Média de horas confortáveis	Quente demais	Frio demais	Conta de resfriamento	vs. atual
Tijolo cerâmico furado de 14 cm + 2 cm de reboco nos dois lados = parede de 18 cm (mais espessa, "tijolo 6 furos em pé")	7.357 h = 84% Bom 4/5	627 h	776 h	R\$ 1.358/ano	R\$ -224/ano
Bloco de concreto de 14 cm + 1,5 cm de reboco nos dois lados = parede de 17 cm	7.285 h = 83% Bom 4/5	694 h	781 h	R\$ 1.543/ano	R\$ -39/ano
Bloco cerâmico furado de 8 furos 9x19x19 cm + 2 cm de reboco nos dois lados = parede de 13 cm (bloco padrão brasileiro) (atual)	7.102 h = 81% Bom 4/5	811 h	847 h	R\$ 1.582/ano	-

Cobertura / forro

Paredes mantidas: Ceramic hollow brick 8-hole 9x19x19 cm + 2 cm plaster both sides = 13 cm wall (standard Brazilian block)

Cobertura / forro	Média de horas confortáveis	Quente demais	Frio demais	Conta de resfriamento	vs. atual
Telha cerâmica + sótão ventilado + laje de concreto de 12 cm (atual)	7.102 h = 81% Bom 4/5	811 h	847 h	R\$ 1.582/ano	-
Telha de fibrocimento + sótão + forro de PVC (cobertura leve)	6.411 h = 73% Aceitável 3/5	1.180 h	1.169 h	R\$ 1.798/ano	+R\$ 216/ano
Telha cerâmica + sótão ventilado + forro de gesso	6.301 h = 72% Aceitável 3/5	1.304 h	1.156 h	R\$ 1.958/ano	+R\$ 376/ano



Horas confortáveis com paredes e coberturas diferentes.

O que conta como bom? (sol e construção)

Sol de verão na parede Regra prática

Energia solar em uma parede vertical sem sombra nos três meses de verão (dez-fev no sul, jun-ago no norte). Quanto menor, melhor: é calor que você não quer.

Baixo 5/5	abaixo de 150 kWh/m²	Pouco calor do sol no verão.
Moderado 4/5	150 a 225 kWh/m²	Algum calor; um beiral ou cor clara resolvem.
Alto 3/5	225 a 300 kWh/m²	Parede quente: precisa de sombra, cor clara ou isolamento.
Muito alto 2/5	300 ou mais kWh/m²	Parede muito quente.

Esta casa: Parede norte 155 Moderado 4/5 | Parede leste 287 Alto 3/5 | Parede sul 179 Moderado 4/5 | Parede oeste 279 Alto 3/5

Fonte: Regra prática deste estudo (nenhuma norma dá um número). Aproximadamente 1,7 / 2,5 / 3,3 kWh/m² por dia. A norma trata o calor das paredes por limites de transmitância térmica e cor da pintura.

Sol de inverno na parede Regra prática

Energia solar em uma parede vertical nos três meses de inverno (jun-ago no sul, dez-fev no norte). Quanto maior, melhor em um inverno fresco: calor de graça (a NBR 15220-3 recomenda aquecimento solar passivo no inverno para a zona 3).

Baixo 2/5	abaixo de 120 kWh/m²	Quase nenhum sol no inverno.
Moderado 3/5	120 a 220 kWh/m²	Algum sol no inverno.
Bom 4/5	220 a 320 kWh/m²	Bom sol no inverno.
Alto 5/5	320 ou mais kWh/m²	Muito calor grátis no inverno.

Esta casa: Parede norte 356 Alto 5/5 | Parede leste 204 Moderado 3/5 | Parede sul 86 Baixo 2/5 | Parede oeste 191 Moderado 3/5

Fonte: Regra prática deste estudo (nenhuma norma dá um número); ABNT NBR 15220-3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas (Maringá costuma ser listada na zona 3).

Transmitância térmica U da parede (NBR 15575-4) Norma brasileira

Com que rapidez o calor atravessa a parede (menor = mais isolada). Limite nas zonas 3 a 8: 3,7 se a pintura externa for clara (absortância solar até 0,6) e 2,5 se for mais escura.

Atende aos dois limites 5/5	abaixo de 2,5 W/m²K	Atende ao limite mesmo com pintura escura.
Só com pintura clara 4/5	2,5 a 3,7 W/m²K	Atende ao limite apenas com pintura de cor clara (absortância 0,6 ou menos).
Não atende 1/5	3,7 ou mais W/m²K	Acima do limite: o método simplificado não é atendido.

Esta casa: Transmitância térmica U da parede externa 2,52 (limite <= 3,7) Só com pintura clara 4/5

Fonte: Projeto de emenda da ABNT NBR 15575-4:2021 (mar/2021): método simplificado para paredes, ventilação e áreas transparentes.

Capacidade térmica da parede (NBR 15575-4)

Norma brasileira

Quanto calor a parede armazena (maior = temperatura interna mais estável). Limite: pelo menos 130 nas zonas 1 a 7.

Não atende 1/5

abaixo de 130 kJ/m²K

Menos armazenamento de calor que o mínimo.

Atende 5/5

130 ou mais kJ/m²K

Atende ao mínimo de 130.

Esta casa: Capacidade térmica da parede externa 134 (limite >= 130)

Atende 5/5

Fonte: Projeto de emenda da ABNT NBR 15575-4:2021 (mar/2021): método simplificado para paredes, ventilação e áreas transparentes.

Transmitância térmica U da cobertura (NBR 15575-5)

Norma brasileira

Fluxo de calor pela cobertura + forro. Limite nas zonas 3 a 6: 2,3 se a cobertura for clara (absortância até 0,6) e 1,5 se for escura (por exemplo, telha cerâmica vermelha).

Atende aos dois limites 5/5

abaixo de 1,5 W/m²K

Atende ao limite mesmo para cobertura escura.

Só cobertura clara 4/5

1,5 a 2,3 W/m²K

Atende ao limite apenas se a superfície da cobertura for clara.

Não atende 1/5

2,3 ou mais W/m²K

Acima do limite.

Esta casa: Transmitância térmica U da cobertura (indicativa) 1,78 (limite <= 1,5)

Só cobertura clara 4/5

Fonte: Projeto de emenda da ABNT NBR 15575-5:2021: método simplificado para coberturas. O U da nossa cobertura é indicativo: o cálculo padrão não modela um sótão ventilado.

6.4 Desempenho térmico pela NBR 15575-1:2021 por simulação (PHFT)

Calculado com: **EnergyPlus + AirflowNetwork + OpenFOAM (CFD)** · o EnergyPlus resolve o calor e o fluxo de ar, o OpenFOAM dá a pressão do vento nas aberturas · detalhes e confiabilidade na seção 9

A edição 2021 da NBR 15575-1 julga o desempenho térmico de uma moradia por simulação computacional: a casa como projetada (**modelo real**) é comparada com a mesma casa construída com materiais de referência (**modelo de referência**: paredes e pisos de 100 mm, cobertura de telha + câmara de ar + laje de 100 mm, janelas com 17% da área do piso, sem sombreamento fixo). O indicador principal é o **PHFT**, a porcentagem das horas ocupadas com temperatura operativa entre 18 e 26 °C (faixa dos climas com média anual abaixo de 25 °C: este arquivo climático tem 23,0 °C), nos dormitórios e na sala, com as janelas abertas apenas quando o ambiente está ocupado e o ar interno está a pelo menos 19 °C e mais quente que o externo. A norma também limita a temperatura operativa máxima e mínima e, nos níveis intermediário e superior, exige redução da carga térmica anual de aquecimento e refrigeração (ar-condicionado ideal a 23 °C / 21 °C quando ocupado).

Ambiente	PHFT real	PHFT referência	Horas de calor %	Horas de frio %	T _{max} / T _{min} real
Sala de estar + jantar	42,4%	34,9%	56,3	1,3	35,1 / 15,9 °C
Quarto 1	64,7%	66,5%	32,7	2,5	32,7 / 15,2 °C
Quarto 2	59,9%	63,1%	38,1	2,0	33,2 / 16,0 °C
Quarto 3	56,5%	60,1%	41,2	2,4	33,2 / 15,7 °C

Resultado para a casa como está: PHFT da moradia = 55,9% contra 56,1% da referência (o nível mínimo exige mais de 90% da referência: **sim**). Temperatura operativa máxima 35,1 °C contra 36,7 °C da referência, com tolerância de +2 °C: **sim**. Mínima 15,2 °C contra 13,6 °C, com tolerância de -1 °C: **sim**. Carga térmica total 6.984 kWh/ano contra 8.641 kWh/ano da referência (19,2% menor). Nível atingido: **Mínimo**.

Pacote	PHFT real	ΔPHFT (necessário 12,4)	T _{max}	T _{min}	Redução da carga	Nível
Situação atual	55,9%	-0,3	35,1	15,2	19,2%	Mínimo
Lã de rocha 50 mm	67,1%	11,0	31,7	16,6	52,0%	Mínimo
Lã de vidro 50 mm	67,6%	11,4	31,6	16,6	53,0%	Mínimo
Lã de PET 50 mm	67,6%	11,4	31,6	16,6	53,0%	Mínimo
Lã de ovelha 50 mm	67,6%	11,4	31,6	16,6	53,0%	Mínimo
Lã de rocha 100 mm	69,7%	13,5	31,1	16,8	57,6%	Superior
Vedação das esquadrias	55,9%	-0,3	35,1	15,2	19,2%	Mínimo
Vidro duplo	55,9%	-0,3	35,0	15,4	19,8%	Mínimo
Vidro duplo low-E	56,9%	0,8	34,8	15,3	23,5%	Mínimo
Brise fixo 0,6 m	56,7%	0,6	35,0	15,2	21,4%	Mínimo
Persianas móveis	56,9%	0,8	35,0	15,1	22,3%	Mínimo
Tudo junto	71,0%	14,8	31,0	16,8	60,2%	Superior

O nível intermediário exige ΔPHFT de pelo menos 45 - 0,58 × PHFT da referência (casa unifamiliar) e a redução de carga da tabela 20; o superior exige o mesmo ΔPHFT e redução de 35% (carga da referência abaixo de 100 kWh/m²·ano) ou 55% (acima), ou PHFT de 95% ou mais. Vedação, vidro e sombreamento quase não mexem nos indicadores; o isolamento da cobertura é o que aproxima a casa dos níveis mais altos (ΔPHFT necessário 12,4; as lâs de 50 mm chegam a 11,4). Níveis atingidos: Lã de rocha 100 mm (Superior), Tudo junto (Superior). Um pacote que cai exatamente no valor necessário está no limite: o resultado muda com pequenas alterações do modelo.

Os níveis da norma e o que significam para morar na casa

Nível	O que a norma exige	Como é morar na casa	Nesta casa
Não atendido	O PHFT é 90% da casa de referência ou menos, ou a temperatura operativa máxima / mínima é pior que a da referência em mais de 2 °C / 1 °C.	A casa é claramente pior que a referência da norma: mais tardes quentes e noites frias dentro de casa, e o ar-condicionado precisa garantir o conforto na maior parte do ano.	Nenhum pacote chega a ele.
Mínimo	PHFT acima de 90% da casa de referência; temperatura operativa máxima no máximo 2 °C acima da referência e mínima no máximo 1 °C abaixo dela.	Tão confortável quanto uma casa feita com os materiais de referência (paredes de 100 mm, cobertura de telha e laje). Nas tardes quentes e nas madrugadas frias os ambientes saem da faixa de 18 a 26 °C; espere usar ventilador ou ar-condicionado em muitos dias e agasalho nas manhãs frias.	Casa atual: PHFT 55,9% contra 56,1% da referência (ΔPHFT -0,3), redução de carga de 19,2%.
Intermediário	Tudo do nível mínimo, mais um ganho de PHFT sobre a casa de referência (ΔPHFT) de pelo menos 45 - 0,58 × PHFT da referência (casa unifamiliar) e uma redução da carga térmica anual de aquecimento e refrigeração (tabela 20).	Bem mais horas na faixa confortável sem nenhum equipamento, ambientes mais frescos à tarde e mais quentes de madrugada, e conta de ar-condicionado menor. O ar-condicionado passa a ser um reforço nos dias mais quentes, e não uma necessidade diária.	Nenhum pacote chega a ele.
Superior	Tudo do nível intermediário, com redução de carga de 35% (carga da referência abaixo de 100 kWh/m²·ano) ou 55% (acima), ou um PHFT de 95% ou mais.	A casa mantém uma temperatura confortável quase sozinha: poucas horas de calor ou frio, o ar-condicionado raramente é necessário e, quando é, um aparelho pequeno basta. É o nível que se paga na conta de luz.	Atingido por Tudo junto : PHFT 71,0%, ΔPHFT 14,8, redução de carga de 60,2%.

A coluna 'Nesta casa' usa os resultados desta simulação; a descrição de como é morar na casa é a nossa leitura dos números, não texto da norma.

Ventilação cruzada (induzida pelo vento)

A ventilação natural é resolvida pela rede de fluxo de ar (AirflowNetwork) do EnergyPlus: cada janela, porta aberta e fresta é um caminho de ar cuja pressão vem do vento (coeficientes de pressão de cada abertura, calculados pelo CFD do OpenFOAM para 24 direções), da diferença de temperatura e da altura da abertura. Trocas de ar por hora pelas janelas e portas externas, casa atual:

Calculado com: **EnergyPlus + AirflowNetwork + OpenFOAM (CFD)** · fluxo de ar pelo AirflowNetwork com coeficientes de pressão do CFD · detalhes e confiabilidade na seção 9

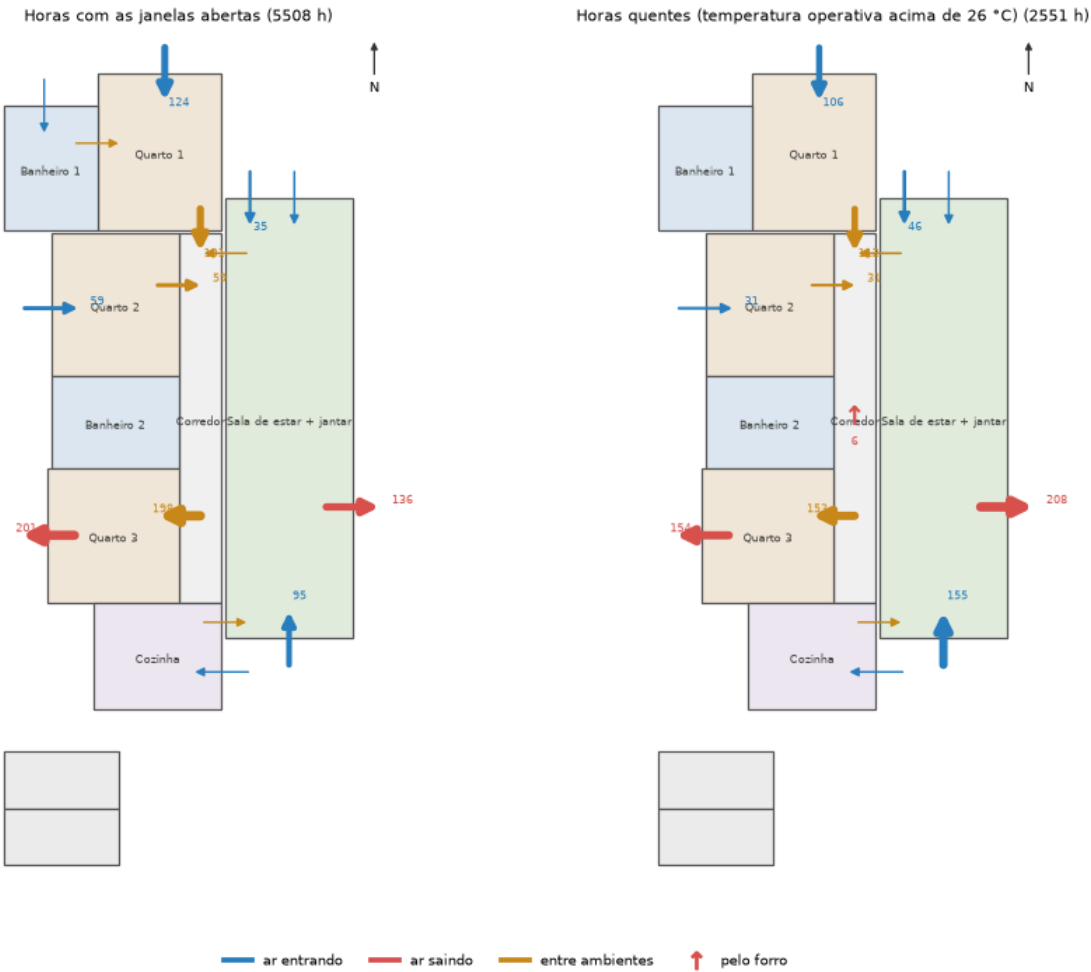
Ambiente	ACH médio	Percentil 90	Horas acima de 5 ACH
Sala de estar + jantar	2,2	8,8	1.742
Quarto 1	2,5	6,0	2.249
Banheiro 1	1,2	1,7	0
Quarto 2	2,4	6,5	2.705
Banheiro 2	1,3	1,8	0
Quarto 3	2,9	8,0	3.077
Cozinha	0,3	0,6	0

Como o ar circula pela casa

Calculado com: EnergyPlus + AirflowNetwork + OpenFOAM (CFD) · rede de fluxo de ar do EnergyPlus com os coeficientes de pressão do CFD do OpenFOAM · detalhes e confiabilidade na seção 9

A rede de fluxo de ar dá, para cada hora, o volume de ar que atravessa cada janela, porta e abertura. A figura mostra a média desses fluxos na planta, para todas as horas com as janelas abertas e para as horas quentes (temperatura operativa acima de 26 °C); as setas são azuis onde entra ar fresco, vermelhas onde o ar sai da casa, laranja para o ar que passa entre ambientes, e a espessura segue a vazão em m³/h. É o fluxo entre ambientes (um nó de ar por ambiente), não um campo de velocidades dentro de cada ambiente: mostra quais aberturas alimentam a casa e por onde o ar sai, não a corrente de ar num ponto.

Como o ar se move pela casa (fluxo líquido de cada abertura) — m³/h



Abertura	Tipo	O ar vai de	para	m³/h
janela 2 · Sala de estar + jantar	janela	Sala de estar + jantar	exterior	208
janela 3 · Sala de estar + jantar	janela	exterior	Sala de estar + jantar	155
janela 1 · Quarto 3	janela	Quarto 3	exterior	154
porta 5 · Corredor	porta	Corredor	Quarto 3	153
porta 2 · Quarto 1	porta	Quarto 1	Corredor	112
janela 1 · Quarto 1	janela	exterior	Quarto 1	106
janela 1 · Sala de estar + jantar	janela	exterior	Sala de estar + jantar	46
janela 1 · Quarto 2	janela	exterior	Quarto 2	31
porta 4 · Corredor	porta	Quarto 2	Corredor	31

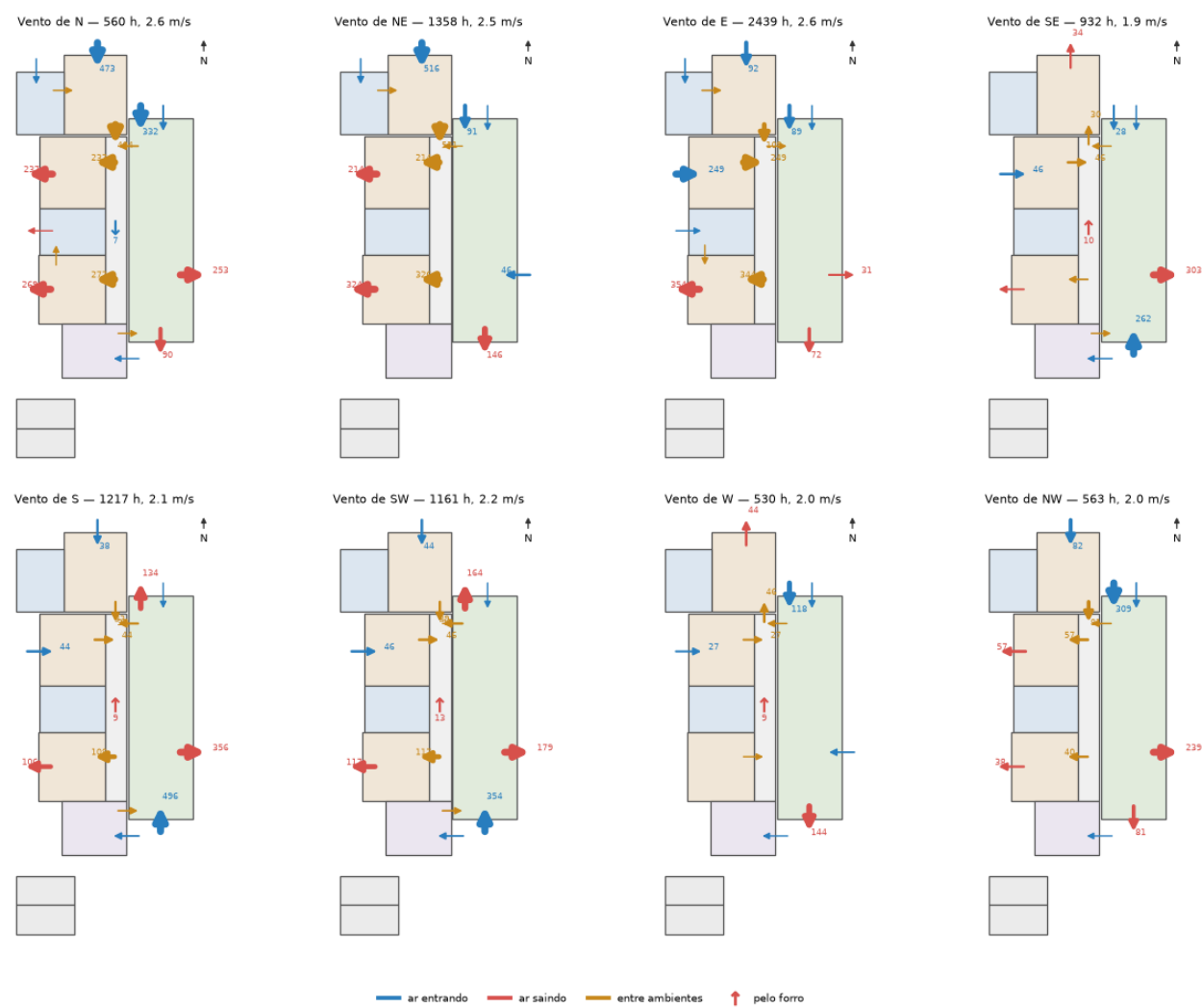
Principais caminhos do ar da casa atual nas horas quentes (vazões abaixo de 20 m³/h omitidas).

Circulação para cada direção do vento

Calculado com: EnergyPlus + AirflowNetwork + OpenFOAM (CFD) · rede de fluxo de ar do EnergyPlus com os coeficientes de pressão do CFD do OpenFOAM · detalhes e confiabilidade na seção 9

Os mesmos fluxos, separados pela direção de onde o vento vem (oito setores de 45°, vento do arquivo climático). A pressão em cada abertura vem dos 24 casos de CFD; por isso o padrão muda com o vento: as aberturas a barlavento alimentam a casa e as de sotavento ou sob sucção deixam o ar sair.

Fluxo de ar para cada direção do vento (horas com as janelas abertas) — m³/h

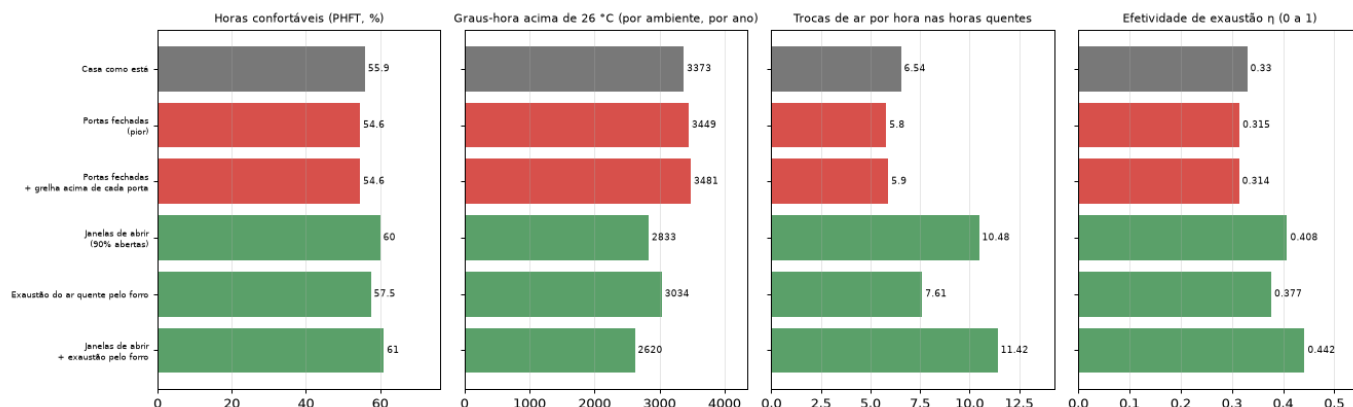


Alterações da planta que melhoram ou pioram a ventilação

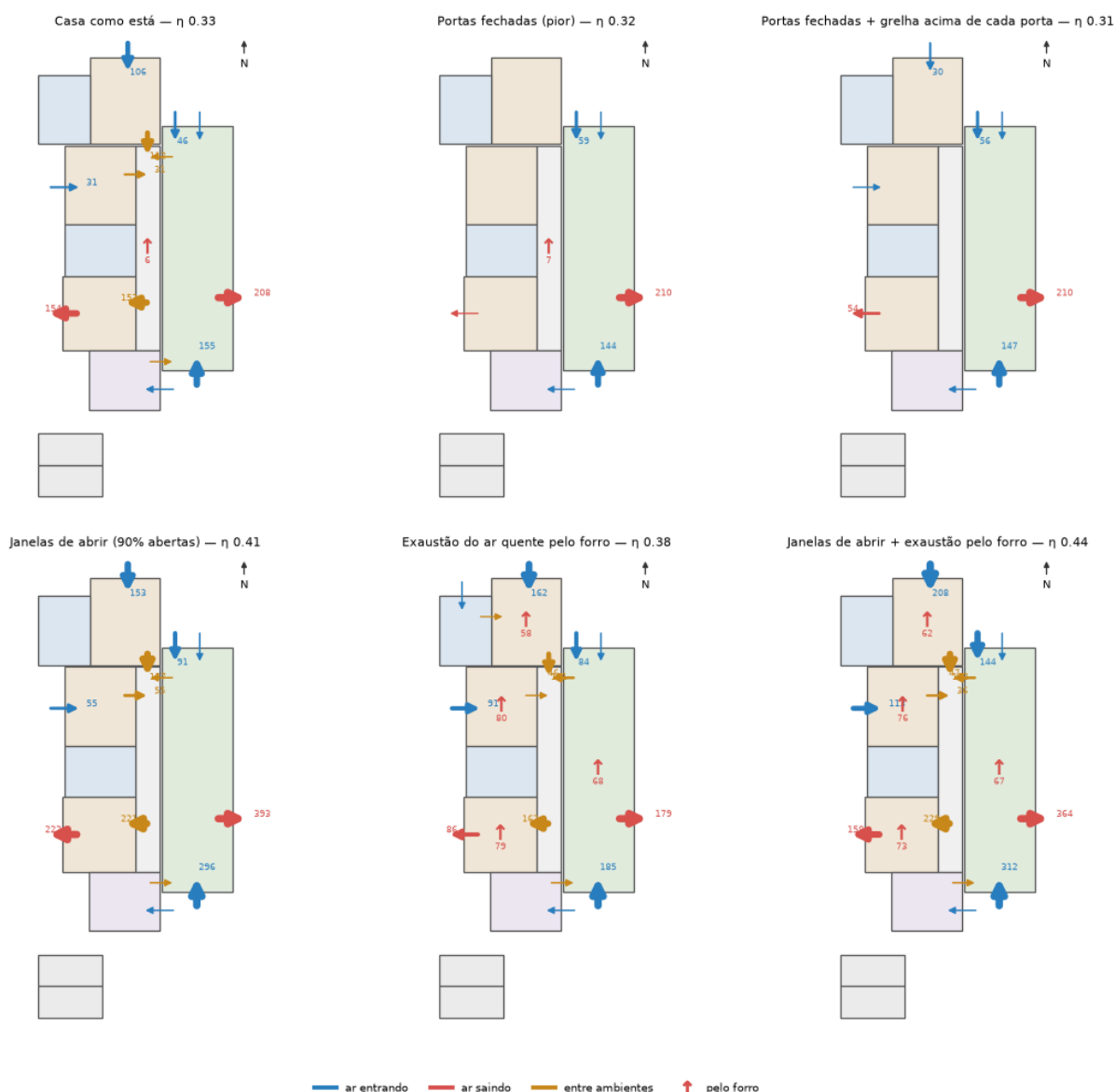
Calculado com: EnergyPlus + AirflowNetwork + OpenFOAM (CFD) · rede de fluxo de ar do EnergyPlus com os coeficientes de pressão do CFD do OpenFOAM · detalhes e confiabilidade na seção 9

Cada alteração é uma nova simulação do ano inteiro do mesmo modelo, com o mesmo clima, a mesma ocupação e as mesmas pressões do CFD; só muda a abertura em questão. A tabela compara o conforto e a exaustão do ar quente, nas horas ocupadas dos quartos e da sala.

Alteração	PHFT	Mais quente °C	Graus-hora acima de 26 °C	Trocas de ar por hora nas horas quentes	Efetividade de exaustão η	Calor retirado (kWh/ano)
Casa como está Janelas de correr (50% abertas), portas dos quartos e da sala abertas enquanto o ambiente está ocupado.	55,9%	35,1	3.373	6,5	0,33	7.541
Portas fechadas (pior) As portas entre os quartos / sala e o resto da casa ficam fechadas: o ar não tem por onde passar.	54,6% (-1,3)	35,2	3.449 (+76)	5,8 (-0,7)	0,32 (-0,02)	6.618 (-923)
Portas fechadas + grelha acima de cada porta As mesmas portas fechadas, com uma grelha permanente de 0,5 x 0,4 m acima de cada uma (a bandeira ventilada usual).	54,6% (-1,3)	35,1	3.481 (+108)	5,9 (-0,6)	0,31 (-0,02)	6.854 (-687)
Janelas de abrir (90% abertas) Janelas que abrem 90% da área envidraçada (de abrir ou maxim-ar) no lugar dos 50% das de correr, mesmo tamanho e caixilho.	60,0% (+4,1)	34,9	2.833 (-540)	10,5 (+3,9)	0,41 (+0,08)	9.005 (+1464)
Exaustão do ar quente pelo forro Uma grelha de 0,2 m² no forro de cada quarto e da sala, e aberturas de beiral do ático 5 vezes maiores (2% da área do piso, em vez de 0,4%).	57,5% (+1,6)	35,0	3.034 (-339)	7,6 (+1,1)	0,38 (+0,05)	11.180 (+3639)
Janelas de abrir + exaustão pelo forro Janelas de abrir (90%) junto com as grelhas no forro e as aberturas de beiral maiores.	61,0% (+5,1)	35,0	2.620 (-753)	11,4 (+4,9)	0,44 (+0,11)	12.533 (+4992)



Fluxo de ar nas horas quentes em cada alteração da planta — m³/h



Leitura: a melhor alteração para o conforto é **Janelas de abrir + exaustão pelo forro** (PHFT 61,0% contra 55,9%, efetividade de exaustão 0,44 contra 0,33); a pior é **Portas fechadas (pior)** (PHFT 54,6%). A casa de referência tem PHFT 56,1%.

Efetividade da exaustão do ar quente

Calculado com: **EnergyPlus + AirflowNetwork** · temperaturas e vazões da rede de fluxo de ar · detalhes e confiabilidade na seção 9

Não existe um coeficiente padrão único para isso; por isso o relatório usa três indicadores mensuráveis: (1) as **trocas de ar por hora nas horas quentes**; (2) a **efetividade de exaustão η** = $(T_{\text{fechada}} - T_{\text{ventilada}}) \div (T_{\text{fechada}} - T_{\text{externa}})$, calculada com as temperaturas operativas de cada ambiente nas horas ocupadas em que a casa de janelas fechadas passa de 26 °C e está mais de 1 °C acima do ar externo (0 = a ventilação não resfria o ambiente, 1 = o ambiente acompanha o ar externo); (3) o **calor retirado** pelo ar que sai da casa, p-cp-V(T zona - T externa), em kWh por ano. A idade do ar e a retirada de uma pluma de ar quente junto ao forro exigem um CFD interno, que este estudo não faz.

Os coeficientes de pressão do vento (Cp) de cada janela, porta e abertura de beiral vêm de uma **simulação CFD com o OpenFOAM** (RANS permanente, k-epsilon, camada limite atmosférica sobre rugosidade suburbana, 24 direções de vento (a cada 15°), 1,2 a 2,0 milhões de células cada; pressão lida 0,3 m à frente de cada abertura e expressa como coeficiente da pressão dinâmica do perfil de vento do EnergyPlus na altura da abertura). Em relação aos coeficientes genéricos de Swami & Chandra, a CFD dá mais sucção e sobrepressão nas aberturas (maior Cp a barlavento 0,37 contra 0,60; diferença média por abertura 0,42). Efeito no resultado: PHFT da moradia 55,9% com a CFD contra 57,5% com os coeficientes genéricos, referência 56,1% contra 57,0% (ΔPHFT -0,3 contra 0,5): o veredito não depende dessa escolha.

A casa no CFD segue a geometria real do modelo IFC: os dois telhados com vale e cumeeira (até 4,1 m), os beirais e os telhados do carport e das varandas como placas finas, com janelas e portas fechadas. Uma primeira versão usava os ambientes extrudados até um topo plano de 3,5 m; a forma real do telhado muda os coeficientes em 0,63 em média por abertura (raiz do erro quadrático médio nas 12 direções que as duas versões têm), principalmente nas aberturas do forro e nas janelas sob os beirais.

Quanto confiar no CFD (verificação numérica)

- Teste da caixa:** uma caixa simples de 22 × 11 × 3 m dá Cp médio de 0,69 na parede a barlavento e -0,35 a sotavento; o Eurocódigo (EN 1991-1-4, tabela 7,1, zonas D e E, h/d = 0,27) dá 0,70 e -0,31.
- Malha:** três malhas (célula de 2,0 / 1,2 / 0,8 m, até 1,1 milhão de células) diferem por um rms de 0,06 (grossa x média) e 0,07 (média x fina) no Cp, em 64 pontos abertura-direção: as diferenças não diminuem com o refino, então o erro de malha é de cerca de ±0,1 e não dá para afirmar uma ordem de convergência.
- Rugosidade do terreno** (0,1 m e 1,0 m em vez de 0,3 m): rms 0,11 e 0,14. **Domínio** 1,5 vez maior: rms 0,04.
- Incerteza combinada do Cp de cada abertura:** mediana ±0,21, 95% das aberturas dentro de ±0,43. Mover todos os coeficientes por essa quantia ao mesmo tempo muda o PHFT da moradia em 0,1 ponto(s) e o da referência em 0,1 ponto(s): o resultado da NBR 15575 não depende dessa incerteza.
- Modelo de turbulência:** foi mantido o k-épsilon padrão: na caixa simples ele dá o Cp médio mais próximo do Eurocódigo (barlavento 0,69, erro 0,05) contra o k-épsilon realizable (0,65, 0,08) e o k-ômega SST (0,57, 0,14); na casa os modelos diferem por um rms de 0,02 (realizable) e 0,08 (SST), o que já está na incerteza acima.
- Ajuste do perfil de vento:** o EnergyPlus aplica o Cp à pressão dinâmica do seu próprio perfil de vento (lei de potência) na altura da abertura, e não à do CFD. As pressões do CFD foram convertidas (fator de 0,4 a 0,8 conforme a altura); sem isso a pressão do vento ficaria superestimada em até 2,5 vezes nas janelas.
- Os valores de y+ junto às paredes são grandes (1,000 a 4,000), como é usual em edificações em escala real; as pressões médias pouco dependem disso, mas a tensão de cisalhamento na parede não é confiável.

Limites da CFD: os muros do lote e as edificações vizinhas estão incluídos, mas com alturas estimadas por fotografias, e não há árvores; janelas e portas fechadas no CFD (só o exterior é resolvido); um modelo RANS permanente dá só pressões médias (sem rajadas nem esteira transiente). Use como estimativa melhor que a genérica, não como resultado de túnel de vento.

Fonte do procedimento: seção 11,4 da ABNT NBR 15575-1:2021 (texto integral, cópia guardada em norms/source_docs) e o projeto público de emenda de março de 2021 (LabEEE); as tabelas 3, 4, 20 e 21 conferem nos dois, e a equação da figura 4 (ΔPHFT_{min} = 45 – 0,58 × PHFT da referência, unifamiliar) foi lida da figura do projeto. Zona bioclimática: um artigo não oficial (UGREEN, outubro de 2026, guardado em norms/source_docs) diz que Maringá passou da zona 1 para a zona 4B na NBR 15220-3:2024, que está entre as zonas em que vale o critério de temperatura mínima; a norma de 2024 em si não foi conferida. Suposições nossas: a cozinha e o corredor são ambientes de permanência transitória (não entram no PHFT); a porta de correr de vidro é tratada como janela; as portas internas entre dormitório ou sala e ambiente transitório ficam abertas; a faixa de 18-26 °C e os pontos de ajuste de 23/21 °C valem porque a temperatura média anual está abaixo de 25 °C; os coeficientes de pressão do vento vêm do CFD (a fórmula genérica de Swami & Chandra fica só como comparação); os muros do lote e as edificações vizinhas estão no CFD com alturas estimadas, mas não nos modelos de sombra e de luz natural; a temperatura do solo é a média anual do arquivo climático.

6,5 CFD do vento: como foi calculado e quanto confiar

Calculado com: **OpenFOAM (CFD)** - detalhes e confiabilidade na seção 9

Esta seção detalha a simulação de vento por trás dos resultados de ventilação cruzada acima. Em resumo: a casa é colocada num túnel de vento virtual, o escoamento do ar em volta dela é resolvido uma vez para cada direção do vento, e a pressão que o vento exerce à frente de cada janela, porta e abertura de beiral vira um coeficiente (Cp) que a rede de fluxo de ar do EnergyPlus multiplica pela velocidade real do vento de cada hora.

Configuração do cálculo

Direções do vento	24 (a cada 15°)
Geometria da casa	invólucro fechado reconstruído do modelo IFC: os dois telhados com vale e cumeeira (até 4,1 m), os beirais, os telhados do carport e das varandas como placas finas; janelas e portas fechadas (só o exterior é resolvido)
Domínio de cálculo	6H a montante, 15H a jusante, 5H de cada lado e 6H acima, com H a altura da edificação (4,1 m): as regras usuais de engenharia de vento computacional
Malha	snappyHexMesh (castellated + snap); células de fundo de 1,2 m refinadas até cerca de 0,15 m na casa; 1.154 a 1.991 mil células por direção
Vento de aproximação	camada limite atmosférica com perfil logarítmico, 10 m/s a 10 m sobre terreno suburbano (comprimento de rugosidade 0,3 m)
Equações e modelo	Navier-Stokes com média de Reynolds em regime permanente, modelo de turbulência kEpsilon, resolvido pelo simpleFoam (OpenFOAM v2312, Docker); funções de parede na casa e no solo rugoso
Convergência	resíduos abaixo de p 1e-5, U 1e-6, k/epsilon 1e-5; mediana de 344 iterações (máximo 885)
Entorno	muros do lote (3,2 m do lado leste até o carport e 2,6 m depois dele, 1,8 m no lado oeste e nos fundos, 3,2 m onde o muro dos fundos encontra a edícula do vizinho) e as casas vizinhas, as casas do outro lado da rua e a edícula do vizinho como caixas fechadas. Todas as alturas são estimativas feitas por fotografias e pela descrição do proprietário (vizinhos térreos com cumeeira de 4,4 m, a 1,5 m do muro); são malhadas de forma mais grossa (0,6 m) que a casa
Onde a pressão é lida	34 pontos, cada um 0,3 m à frente de uma janela, porta, fresta de parede ou abertura do forro externas; média das últimas 20 iterações

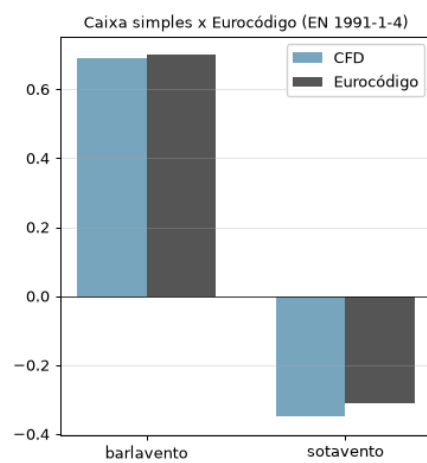
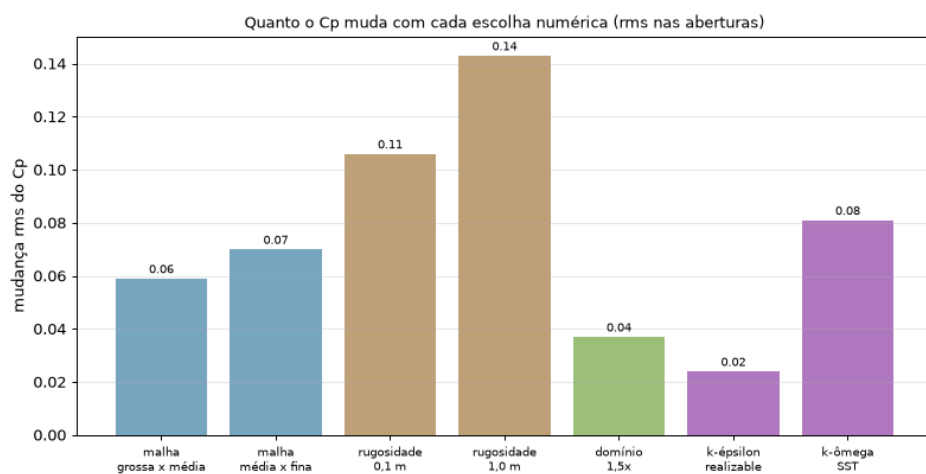
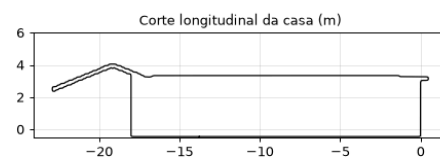
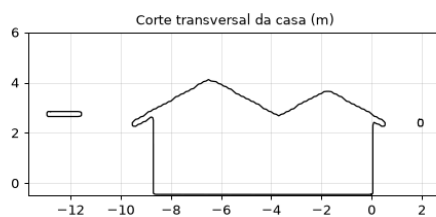
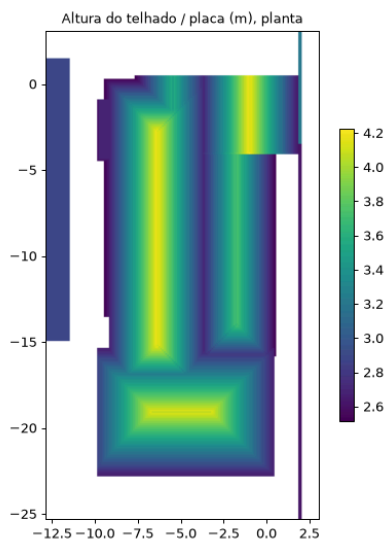
Da pressão ao coeficiente usado pelo EnergyPlus

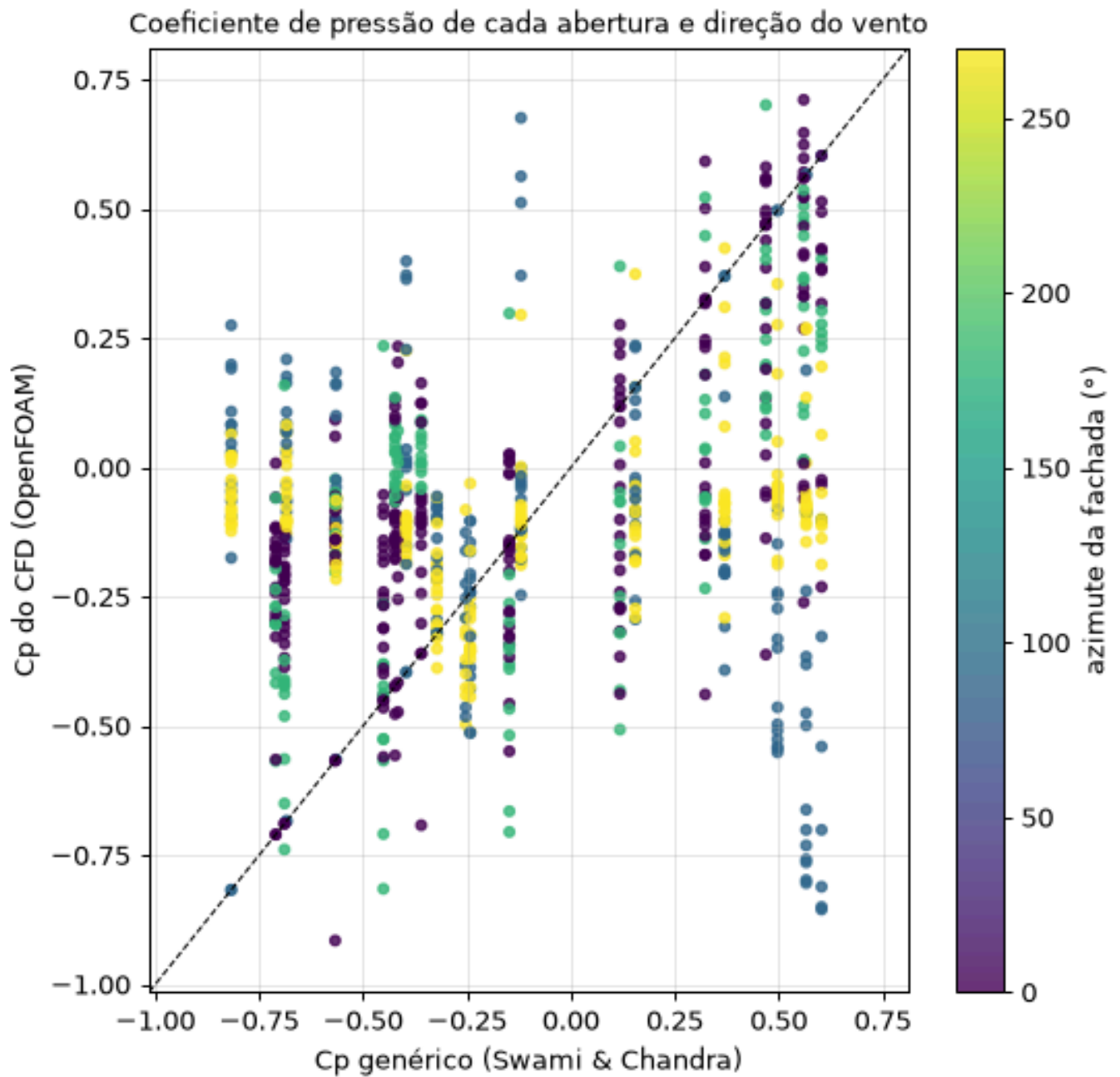
O EnergyPlus calcula a pressão do vento numa abertura como Cp × ½ρU(z)², com U(z) a velocidade do vento na altura da abertura tirada do perfil dele (lei de potência com expoente 0,22 para subúrbio). O CFD dá a pressão real p, então o coeficiente é Cp = p / (½ U_EP(z)²). Como a entrada do CFD é logarítmica, isso equivale a multiplicar o coeficiente do CFD por (U_CFD(z) / U_EP(z))²: 0,39 / 0,49 / 0,61 / 0,79 a 0,75 / 1,05 / 1,6 / 3,05 m. Sem esse passo a pressão do vento nas janelas ficaria superestimada em até 2,5 vezes.

Resultados da verificação numérica

Verificação	Como	Resultado (mudança rms do Cp)
Malha	células de 2,0 / 1,2 / 0,8 m (94 mil a 1,1 milhão de células), duas direções	0,06 / 0,07; não diminui com o refino
Rugosidade do terreno	0,1 m e 1,0 m em vez de 0,3 m	0,11 / 0,14
Tamanho do domínio	1,5 vez maior em todas as direções	0,04
Modelo de turbulência	k-épsilon realizable e k-ômega SST em vez do k-épsilon padrão	0,02 / 0,08
Caso de referência	caixa simples de 22 × 11 × 3 m contra o Eurocódigo (EN 1991-1-4, tabela 7,1, zonas D e E)	barlavento 0,69 contra 0,70; sotavento -0,35 contra -0,31
Coefficientes genéricos	Swami & Chandra, usados quando não há CFD	0,42
Primeira versão do CFD	ambientes extrudados até um topo plano de 3,5 m	0,63

Combinando as diferenças de malha, rugosidade, domínio e modelo de turbulência, a incerteza de cada Cp é de ±0,21 (mediana) e ±0,43 (95% das aberturas). Mover todos os coeficientes para cima e para baixo por essa quantia ao mesmo tempo muda o PHFT da moradia entre 55,4% e 55,3% e o da referência entre 53,8% e 53,7%: o nível da NBR 15575 não depende disso.





Figuras: a casa como o CFD a enxerga (planta das alturas do telhado e dois cortes); quanto o C_p muda com cada escolha numérica e o teste da caixa; e o coeficiente do CFD de cada abertura e direção do vento contra os genéricos (pontos sobre a linha tracejada concordam).

7. Melhorias: isolamento, vedação, vidro e sombreamento

Cada melhoria abaixo é simulada no ano inteiro e comparada com a casa como ela é hoje. A **lã no telhado** fica sobre o forro (lado do sótão); a **vedação** são borrachas e escovas nas esquadrias e portas; o **vidro duplo** substitui o vidro simples; o **brise fixo** é uma projeção horizontal sobre cada janela; as **persianas móveis** fecham sozinhas no modelo quando o sol na janela é forte. A última linha combina as principais medidas.

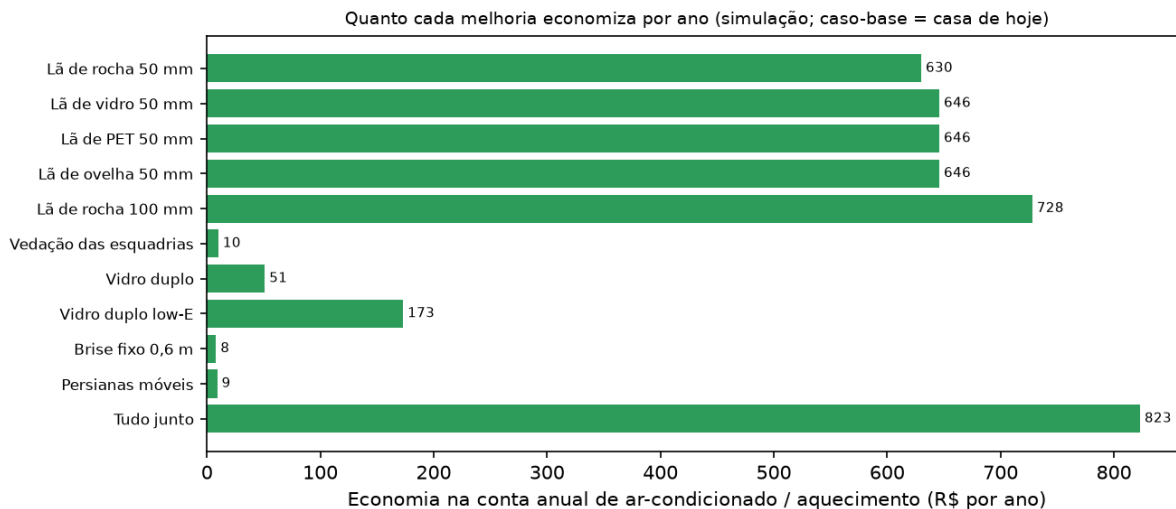
7,1 Resultados por melhoria

Melhoria	O que é	Horas confortáveis	Horas quente demais	Hora mais quente	Resfriamento R\$/ano	Variação na conta	Luz natural
Situação atual	Casa existente	83,9% Bom 4/5	554 h	32,3 °C	R\$ 1.582	R\$ 0/ano	100%
Lã de rocha 50 mm	Lã de rocha 50 mm	88,9% Bom 4/5	311 h	30,6 °C	R\$ 952	R\$ -630/ano	100%
Lã de vidro 50 mm	Lã de vidro 50 mm	89,0% Bom 4/5	306 h	30,6 °C	R\$ 936	R\$ -646/ano	100%
Lã de PET 50 mm	Lã de PET (garrafas recicladas) 50 mm	89,0% Bom 4/5	307 h	30,6 °C	R\$ 936	R\$ -646/ano	100%
Lã de ovelha 50 mm	Lã de ovelha 50 mm	89,0% Bom 4/5	307 h	30,6 °C	R\$ 936	R\$ -646/ano	100%
Lã de rocha 100 mm	Lã de rocha 100 mm	89,4% Bom 4/5	286 h	30,3 °C	R\$ 854	R\$ -728/ano	100%
Vedação das esquadrias	Borrachas e escovas de vedação nas esquadrias e portas	84,0% Bom 4/5	551 h	32,3 °C	R\$ 1.572	R\$ -10/ano	100%
Vidro duplo	Vidro duplo incolor	84,2% Bom 4/5	548 h	32,3 °C	R\$ 1.531	R\$ -51/ano	89%
Vidro duplo low-E	Vidro duplo low-E	84,5% Bom 4/5	513 h	32,2 °C	R\$ 1.409	R\$ -173/ano	80%
Brise fixo 0,6 m	Brise horizontal fixo 0,6 m	83,9% Bom 4/5	548 h	32,3 °C	R\$ 1.574	R\$ -8/ano	100%
Persianas móveis	Persianas / venezianas móveis (fechadas com sol forte)	83,9% Bom 4/5	547 h	32,3 °C	R\$ 1.573	R\$ -9/ano	100%
Tudo junto	Lã de rocha 50 mm; Borrachas e escovas de vedação nas esquadrias e portas; Vidro duplo low-E; Brise horizontal fixo 0,6 m; Persianas / venezianas móveis (fechadas com sol forte)	89,5% Bom 4/5	284 h	30,4 °C	R\$ 759	R\$ -823/ano	80%

Calculado com: **Motor rápido (Python, deste projeto)** - conferência com o EnergyPlus em 7,4 - detalhes e confiabilidade na seção 9

De onde vêm os números da tabela acima:

Coluna	Como é calculada	Motor	Quanto confiar
Horas confortáveis	Parcela das 8,760 horas do ano em que a temperatura operativa do ambiente (média entre a do ar e a das superfícies) está dentro da faixa de 80% de aceitabilidade do modelo adaptativo da ASHRAE 55; média dos ambientes. O ar-condicionado funciona no seu horário neste cálculo, por isso o percentual é maior que o PHFT da seção 6,4 (casa sem ar-condicionado).	Motor rápido. Conferido com o EnergyPlus em 7,4.	Média: boa para ordenar as melhorias, o percentual absoluto é aproximado.
Horas quente demais	Horas do ano com a temperatura operativa acima do limite superior da mesma faixa; média por ambiente.	Motor rápido.	Média, igual à anterior.
Hora mais quente	Maior temperatura operativa do ano em cada ambiente, em média dos ambientes. Vem de uma hora do ano climático típico; ondas de calor reais serão mais quentes.	Motor rápido.	Média-baixa: uma única hora extrema é sensível ao arquivo climático.
Resfriamento R\$/ano	Calor retirado por um ar-condicionado que mantém 26 °C nas horas de uso de cada tipo de ambiente, dividido pela eficiência (COP 3,0) e multiplicado pela tarifa (R\$ 1,00/kWh, suposição definida no arquivo do projeto).	Motor rápido (energia); tarifa e COP são suposições.	Baixa: use como ordem de grandeza e para comparar melhorias. O EnergyPlus dá cerca de metade desta energia (7,4).
Variação na conta	Custo de resfriamento (e de aquecimento, quando ativado) da melhoria menos o custo da casa como está. Negativo = economia.	Motor rápido.	Baixa-média: a diferença entre melhorias é mais confiável que o valor absoluto.
Luz natural	Transmitância visível do vidro novo dividida pela do vidro existente. Conta só o vidro: persianas e sombreamento não entram aqui e nenhum motor de luz é rodado para esta coluna.	Valor de catálogo (sem motor); a luz natural da própria casa está nas seções de luz natural (Radiance).	Média: valor de catálogo, não um cálculo.



7,2 Qual lã e que espessura? (variação na conta anual e média de horas confortáveis)

Lã	25 mm	50 mm	75 mm	100 mm	150 mm
Lã de vidro λ 0,040 W/m·K	R\$ -516 88,1%	R\$ -646 89,0%	R\$ -705 89,3%	R\$ -738 89,5%	R\$ -774 89,7%
Lã de rocha λ 0,044 W/m·K	R\$ -496 88,0%	R\$ -630 88,9%	R\$ -693 89,2%	R\$ -728 89,4%	R\$ -766 89,6%
Lã de PET (garrafas recicladas) λ 0,040 W/m·K	R\$ -516 88,1%	R\$ -646 89,0%	R\$ -705 89,3%	R\$ -738 89,5%	R\$ -774 89,6%
Lã de ovelha λ 0,040 W/m·K	R\$ -517 88,1%	R\$ -646 89,0%	R\$ -705 89,3%	R\$ -738 89,5%	R\$ -773 89,6%

Calculado com: **Motor rápido (Python, deste projeto)** - detalhes e confiabilidade na seção 9

Negativo = economia por ano. Mais lã sempre ajuda, com retorno decrescente: os primeiros 50 mm dão a maior parte do benefício. As lãs diferem pouco na condutividade; a escolha costuma depender de preço, comportamento ao fogo, manuseio e umidade.

7,3 Valores usados e quão confiáveis são

Medida	Valor usado	Confiança no valor	Fonte
Lã de vidro	λ 0,040 W/m·K, ρ 15 kg/m³	típico	range 0,030-0,046 W/mK (Saint-Gobain, wool insulation comparison); mid-range value
Lã de rocha	λ 0,044 W/m·K, ρ 40 kg/m³	verificado	Rockwool datasheet (panel, 0,044 W/mK at 50 °C, EN 12667)
Lã de PET (garrafas recicladas)	λ 0,040 W/m·K, ρ 30 kg/m³	suposição	typical manufacturer range 0,037-0,041 W/mK; check the product you buy
Lã de ovelha	λ 0,040 W/m·K, ρ 25 kg/m³	suposição	typical range 0,038-0,042 W/mK; check the product you buy
Vidro simples (existente)	U 5,8 W/m²K, g 0,85, VT 0,88	verificado	5,8 W/m²K is the single-glass limit of EN 673 / ISO 10077
Vidro duplo incolor	U 2,8 W/m²K, g 0,76, VT 0,78	típico	typical catalogue values for 4-12-4 clear double glazing (EN 673 / NFRC ranges)
Vidro duplo low-E	U 1,8 W/m²K, g 0,40, VT 0,70	típico	typical catalogue values for low-E (solar control) double glazing
Borrachas e escovas de vedação nas esquadrias e portas	trocas de ar com a casa fechada ~25%	suposição	AIVC: weatherstripping alone cuts house air change 10-14,7%, a full retrofit up to 27,5%; 25% used for frames and doors
Brise horizontal fixo	profundidade definida por pacote	suposição	analytic profile-angle shading of the window (sun-path geometry, pvlib); depth in metres from project.json
Persianas / venezianas móveis (fechadas com sol forte)	ganho fechado x0,3	suposição	external blinds let through about 10-30% of solar gain when closed; closed when direct sun on the window exceeds 250 W/m2 (08-18 h)

Calculado com: **Modelo 3D (IFC) e tabelas** - valores de catálogo, não calculados - detalhes e confiabilidade na seção 9

Os preços das melhorias não estão incluídos: com um orçamento, divida-o pela economia anual para obter o tempo de retorno. Coluna de luz natural: parcela da luz natural que ainda entra (só a transmitância do vidro; persianas e brise não são aplicados à luz natural).

7,4 Conferência com um motor de referência (EnergyPlus)

Calculado com: **EnergyPlus + AirflowNetwork** - detalhes e confiabilidade na seção 9

Todos os pacotes acima foram recalculados com o **EnergyPlus** (Departamento de Energia dos EUA), motor de código aberto validado pela norma ASHRAE 140 e usado dentro do DesignBuilder e do OpenStudio. Ele resolve o balanço de calor de cada superfície com funções de transferência de condução, compartilha as paredes entre os ambientes, modela o forro ventilado acima de cada ambiente, sombreia as janelas com os beirais reais e usa ventilação por vento e empuxo térmico (janelas 50% abertas quando o ar externo está mais frio e acima de 18 °C). O ar-condicionado mantém o mesmo ponto de ajuste, horários e COP do motor rápido. Nenhum dos dois motores considera ganhos internos (pessoas, lâmpadas, aparelhos).

Pacote	Conforto % sem ar-cond. (EnergyPlus)	Ar-cond. kWh/ano rápido	Ar-cond. kWh/ano EnergyPlus	Economia/ano EnergyPlus
Situação atual	78,6	1.582	733	-
Lã de rocha 50 mm	84,8	952	265	R\$ 468
Lã de vidro 50 mm	84,8	936	256	R\$ 477
Lã de PET 50 mm	84,8	936	256	R\$ 477
Lã de ovelha 50 mm	84,8	936	256	R\$ 477
Lã de rocha 100 mm	85,1	854	208	R\$ 525
Vedação das esquadrias	78,8	1.572	729	R\$ 4
Vidro duplo	79,1	1.531	714	R\$ 19
Vidro duplo low-E	79,2	1.409	668	R\$ 65
Brise fixo 0,6 m	78,8	1.574	709	R\$ 24
Persianas móveis	78,6	1.573	698	R\$ 35
Tudo junto	84,2	759	183	R\$ 550

Resultado com o EnergyPlus: caso base: 78,6% das horas na zona de conforto (motor rápido 81,0%), 556 horas de calor (rápido 812), 1321 horas de frio (rápido 847); ar-condicionado 733 kWh/ano (rápido 1.582). Os dois motores concordam na ordem: **isolar a cobertura é de longe a melhor medida**; vidro e sombreamento mudam pouco.

Diferenças entre os motores são esperadas: o EnergyPlus dá cerca de metade da energia de ar-condicionado do motor rápido e mais horas de frio (ele acopla o piso ao solo e perde calor pelo forro com mais liberdade). Para decisões, prefira os números do EnergyPlus; o motor rápido continua útil para simulações rápidas de hipóteses. Ainda não modelados: ganhos internos, abertura de portas, a inclinação do telhado (usa-se um telhado plano com o mesmo volume de forro) e a sombra dos vizinhos.

8. Classificação de luz natural para construção sustentável (LEED / IES LM-83)

Calculado com: **Motor rápido (Python, deste projeto)** - conferência com o Radiance em 8,1 - detalhes e confiabilidade na seção 9

O LEED é a certificação de construção sustentável mais usada no mundo. O crédito de luz natural (v4,1, Opção 1) é dado a partir do **sDA300/50%** simulado (parcela do piso de permanência que recebe 300 lux em pelo menos metade das horas de uso) e do **ASE1000,250** (parcela do piso com mais de 1,000 lux de sol direto por mais de 250 horas por ano, risco de ofuscamento e superaquecimento), ambos definidos na norma IES LM-83 (edição atual LM-83-23, fevereiro de 2023). Degraus: sDA médio de pelo menos 40% = 1 ponto, 55% = 2 pontos, 75% = 3 pontos; um ASE acima de 10% precisa ser justificado com uma estratégia contra ofuscamento.

Ambiente	Área m²	sDA300/50%	ASE1000,250	Degrau LEED isolado
Sala de estar (frente)	21,2	2% Sem pontos 2/5	0% Muito baixa 5/5	0 ponto(s)
TV / jantar (fundos)	23,4	100% 3 pontos 5/5	0% Muito baixa 5/5	3 ponto(s)
Quarto 1	15,4	100% 3 pontos 5/5	10% Alta 2/5	3 ponto(s)
Quarto 2	14,4	0% Sem pontos 2/5	0% Muito baixa 5/5	0 ponto(s)
Quarto 3	14,1	8% Sem pontos 2/5	0% Muito baixa 5/5	0 ponto(s)
Cozinha	10,8	0% Sem pontos 2/5	0% Muito baixa 5/5	0 ponto(s)
Casa inteira (ponderada pela área)	99,3	41% 1 ponto 3/5	2% Muito baixa 5/5	1 ponto(s)

Resultado: sDA300/50% ponderado pela área = 40,6% e ASE1000,250 = 1,6%: **1 de 3 ponto(s) de luz natural**. Ambientes abaixo de 40%: Sala de estar (frente), Quarto 2, Quarto 3, Cozinha.

Isto é uma pré-avaliação indicativa: o LEED exige avaliador certificado, modelagem de mobiliário e persianas, grade de 0,6 m e o procedimento completo da LM-83 (nossa grade é de 0,5 m, com 8h-18h como horas de uso e persianas abertas). O LEED v4,1 cita formalmente a edição de 2012 da LM-83; a edição de 2023 mantém as mesmas duas métricas (não conseguimos verificar as mudanças detalhadas). Residências costumam ser certificadas pelo LEED for Homes, cujas regras de luz natural são diferentes.

Luz natural LEED (sDA300/50%, média ponderada pela área dos ambientes de permanência) Padrão internacional

Autonomia espacial de luz natural média de salas, dormitórios e cozinhas (ponderada pela área do piso): parcela do piso que recebe 300 lux em pelo menos metade das horas de uso. O LEED v4,1 dá 1 ponto a partir de 40%, 2 pontos a partir de 55% e 3 pontos a partir de 75%. Apenas pré-avaliação indicativa: um crédito LEED de verdade exige avaliador certificado e o método completo da LM-83.

Sem pontos 2/5	abaixo de 40 % do piso	Abaixo dos 40% necessários para o primeiro ponto.
1 ponto 3/5	40 a 55 % do piso	Atende ao primeiro degrau de luz natural do LEED.
2 pontos 4/5	55 a 75 % do piso	Atende ao segundo degrau de luz natural do LEED.
3 pontos 5/5	75 ou mais % do piso	Atende ao degrau máximo de luz natural do LEED.

Esta casa: Casa inteira 41% 1 ponto 3/5

Fonte: USGBC LEED v4,1, crédito de Luz natural, Opção 1 (simulação): média de sDA300/50% de 40% / 55% / 75% = 1 / 2 / 3 pontos; ASE1000,250 acima de 10% exige estratégia contra ofuscamento (limites lidos na página do crédito v4,1 no LEEDuser); ANSI/IES LM-83-23 (publicada em fev/2023): autonomia espacial de luz natural (sDA) e exposição solar anual (ASE); o LEED v4,1 ainda cita a edição de 2012, com as mesmas duas métricas. Também é exigido ASE1000,250 de no máximo 10% (senão é preciso explicar a estratégia contra ofuscamento). Banheiros, corredores e áreas externas não são de "permanência".

8,1 Conferência com um motor de referência (Radiance)

Calculado com: **Radiance** - detalhes e confiabilidade na seção 9

Os números acima vêm do nosso motor rápido (sol por traçado de raios + estimativa de fluxo dividido com céu uniforme). Para testá-los, os mesmos ambientes e pontos de medição foram recalculados com o **Radiance** (Lawrence Berkeley National Laboratory), motor de código aberto validado pela CIE 171 e usado pelo ClimateStudio e pelo Honeybee: céu de Perez do mesmo arquivo climático, 4 reflexões de luz, método anual de coeficientes de luz natural e a regra da LM-83 que fecha as persianas quando o sol direto atinge mais de 2% do ambiente (transmitância da persiana 5%). Um sensor acima do telhado reproduz a iluminância do arquivo climático com diferença de 1%, então o céu está calibrado.

Ambiente	Área m²	sDA300/50% rápido	sDA300/50% Radiance	ASE Radiance	Lux médio rápido → Radiance
Sala de estar (frente)	21,2	2%	5% Sem pontos 2/5	0%	144 → 187
TV / jantar (fundos)	23,4	100%	10% Sem pontos 2/5	7%	836 → 477
Quarto 1	15,4	100%	15% Sem pontos 2/5	10%	998 → 706
Quarto 2	14,4	0%	0% Sem pontos 2/5	0%	134 → 48
Quarto 3	14,1	8%	0% Sem pontos 2/5	0%	213 → 119
Cozinha	10,8	0%	0% Sem pontos 2/5	0%	256 → 132

Resultado com o Radiance: sDA300/50% ponderado pela área = 5,8% (motor rápido: 40,6%), ASE1000,250 = 3,2%: **0 de 3 ponto(s) de luz natural**. O motor rápido é otimista no fundo dos ambientes; prefira os números do Radiance para decisões.

Ainda não modelados na rodada do Radiance: mobiliário, caixilhos e montantes (usa-se transmitância 0,80 para toda a abertura), a treliça da porta de vidro, os prédios vizinhos e a sombra de árvores. As persianas seguem a regra simplificada da LM-83 por ambiente. Janelas e brise como no caso base.

9. Como foi calculado e quanto confiar

Esta seção conta como os números foram produzidos, para você julgar quanto confiar neles. O motor rápido é código Python aberto escrito para este projeto; ele é conferido com três motores de referência de código aberto: Radiance (luz natural), EnergyPlus (calor, energia e NBR 15575) e OpenFOAM (pressão do vento). Os submodelos rápidos são padrão em física das edificações, mas simplificados. Nada aqui foi medido no edifício real.

Situação da validação: o código é verificado por testes de regressão (o caso-base não pode mudar ao acrescentar um recurso) e por conferências da geometria solar e do balanço de energia; NÃO foi validado contra medições, e os motores de referência rodaram sobre uma versão simplificada do modelo (veja os limites de cada um). Para licença, certificação ou decisão de investimento, confirme com uma simulação feita por profissional qualificado (por exemplo EnergyPlus, Radiance).

Motores de referência



Os logos pertencem aos respectivos projetos (Radiance: LBNL; EnergyPlus: DOE dos EUA / NREL; OpenFOAM: OpenCFD / ESI Group) e aparecem apenas para creditar os programas usados.

Os motores em detalhe: parâmetros, fórmulas e referências

Motor rápido (Python, deste projeto)

Usado para: Sol e sombras, luz natural (lux, lumens, sDA, ASE), tamanho das janelas e horas de ventilação cruzada, temperatura interna, conforto, energia e custo de ar-condicionado / aquecimento, materiais e cenários de melhoria (seções 2 a 7).

Parâmetros:

- 8,760 passos horários do ano climático típico; grade de sensores de 0,5 m a 0,76 m de altura
- Luz natural: eficácia luminosa de 100 lm/W (direta) e 115 lm/W (difusa), refletância média 0,55, fator de utilização 0,45, fator de manutenção 0,8
- Térmico: resistências superficiais 0,04 (externa), 0,13 (parede), 0,17 (forro e piso) m²K/W; coeficiente superficial externo 17 W/m²K; absorptância solar da parede 0,45; U, g e VT do vidro vindos do catálogo
- Conforto: faixa adaptativa da ASHRAE 55, aceitabilidade de 80% e 90%; temperatura externa média móvel limitada a 10-33,5 °C
- Refrigeração: ponto de ajuste e horários por tipo de ambiente (project.json), COP e tarifa como na seção 5,3; janelas fechadas com o equipamento ligado

Fórmulas:

- Lumens a instalar = lux × área ÷ (utilização 0,45 × manutenção 0,8)
- Temperatura de conforto = 0,31 × T(externa média móvel) + 17,8 °C; faixa confortável = ± 3,5 °C (80%) ou ± 2,5 °C (90%)
- Temperatura operativa = (temperatura do ar + temperatura radiante média das superfícies) ÷ 2
- Eletricidade = calor retirado ÷ COP; custo anual = eletricidade × tarifa
- Brise fixo: profundidade da sombra = beiral × tan(ângulo de perfil); persiana móvel: ganho solar × 0,3 quando o sol na janela passa de 250 W/m²
- sDA300/50% = parcela da área do piso com pelo menos 300 lux em 50% das horas ocupadas; ASE1000,250 = parcela da área com 1,000 lux de sol direto por mais de 250 horas

Referências:

- ASHRAE Standard 55: thermal environmental conditions for human occupancy (adaptive comfort model) - <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines>
- ABNT NBR 15575 (Residential buildings - performance) and NBR 15220 (Thermal performance of buildings) - <https://www.abntcatalogo.com.br>
- EN 17037: Daylight in buildings - <https://standards.cencenelec.eu>
- ANSI/IES LM-83-23: sDA and ASE - <https://webstore.ansi.org/standards/iesna/ansiieslm8323>
- Embree ray-tracing kernels (Intel) - <https://github.com/embree/embree>
- IfcOpenShell: open-source IFC toolkit - <https://ifcopenshell.org>
- pvlb python: a Python package for modeling solar energy systems (Holmgren, Hansen, Mikofski, JOSS 2018) - <https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.00884>
- Numba: JIT compiler for Python - <https://numba.pydata.org>

EnergyPlus + AirflowNetwork

Usado para: Conferência do conforto e da energia dos pacotes de melhoria (seção 7,4) e toda a simulação da NBR 15575-1:2021: PHFT, temperaturas operativas máxima e mínima, carga térmica e trocas de ar pelas aberturas (seção 6,4).

Parâmetros:

- Uma zona térmica por ambiente mais uma zona de forro ventilado; paredes compartilhadas entre ambientes; funções de transferência de condução para cada camada
- Janelas como sistemas de vidro simples; beirais reais como superfícies de sombra
- AirflowNetwork: cada janela, porta aberta e fresta é um caminho de ar; coeficientes de pressão do vento vindos do CFD do OpenFOAM (24 direções), velocidade do vento na altura da abertura pelo perfil de lei de potência (expoente 0,22)
- Rodada da NBR 15575: ocupação, iluminação e equipamentos conforme as tabelas da norma; janelas abertas só com o ambiente ocupado, o ar a pelo menos 19 °C e mais quente que o externo; janelas dos banheiros abertas
- Rodada da carga térmica: janelas fechadas, ar-condicionado ideal a 23 °C (refrigeração) e 21 °C (aquecimento) quando ocupado
- Faixa de temperatura operativa de 18-26 °C porque a temperatura média anual do arquivo climático é menor que 25 °C
- Aberturas (SimpleOpening): coeficiente de descarga 0,6, fator de abertura = fração abrível da janela (0,5 de correr), vazamento fechado 0,00063 kg/s (janelas) e 0,0024 kg/s (portas) a 1 Pa, expoente 0,63 / 0,59; aberturas de beiral do ático com 0,4% da área do piso (fresta de 0,0019 kg/s por m² de piso, expoente 0,65)
- Estudo de ventilação (seção 6,4): seis simulações do ano inteiro do mesmo modelo com alterações da planta (portas fechadas, grelha acima das portas, janelas de abrir com 90% de abertura, grelha de 0,2 m² no forro de cada ambiente com beirais 5× maiores, e as duas últimas juntas) mais uma simulação com as janelas fechadas; a vazão por cada abertura é lida hora a hora (AFN Linkage Node Volume Flow Rate)
- Setores de vento das setas de fluxo: oito setores de 45° centrados em N, NE, ... NO, com a direção do vento do arquivo climático; horas quentes = janelas abertas e temperatura operativa média dos quartos e da sala acima de 26 °C

Fórmulas:

- PHFT = horas ocupadas com 18 °C ≤ temperatura operativa ≤ 26 °C ÷ horas ocupadas × 100
- Nível mínimo: PHFT(real) > 0,9 × PHFT(referência); T(máx,real) ≤ T(máx,ref) + 2 °C; T(mín,real) ≥ T(mín,ref) - 1 °C
- ΔPHFT = PHFT(real) - PHFT(referência); os níveis intermediário e superior exigem ΔPHFT ≥ 45 - 0,58 × PHFT(referência)
- Redução da carga = (carga da referência - carga da casa real) ÷ carga da referência

- Vazão por uma abertura (AirflowNetwork, abertura vertical grande): movida pela diferença de pressão $\Delta P = \text{pressão do vento } (C_p \times \frac{1}{2} \rho U^2) \pm \text{pressão de empuxo } (\rho g \Delta h \Delta T/T)$ entre os dois lados
- Trocas de ar por hora (ACH) = volume de ar que entra pelas aberturas externas em uma hora ÷ volume do ambiente
- Vazão por uma abertura: $Q = C_d \times A \times \text{fator de abertura} \times \sqrt{(2 \Delta P / \rho)}$, com ΔP das pressões de vento e de empuxo acima; uma fresta segue $Q = C \times \Delta P^n$
- Calor retirado pela ventilação = $\rho c_p \Sigma V(\text{saída}) \times (T(\text{zona}) - T(\text{externa}))$, com $\rho c_p = 1,2 \times 1005 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, somado em todas as aberturas externas e caminhos forro-ático, hora a hora (kWh por ano)
- Efetividade de exaustão $\eta = (T(\text{fechada}) - T(\text{ventilada})) \div (T(\text{fechada}) - T(\text{externa}))$, com as temperaturas operativas de um ambiente nas horas ocupadas em que a casa fechada passa de 26 °C e está mais de 1 °C acima da externa; 0 = a ventilação não resfria, 1 = o ambiente acompanha o ar externo
- Graus-hora = $\Sigma \text{máx}(T(\text{operativa}) - 26 \text{ °C}, 0)$ nas horas ocupadas

Referências:

- EnergyPlus (US Department of Energy, NREL) - <https://energyplus.net>
- ANSI/ASHRAE Standard 140: Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs - <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-140>
- EnergyPlus AirflowNetwork and surface-averaged wind pressure coefficients of Swami and Chandra (1987), EnergyPlus Engineering Reference - <https://energyplus.net/documentation>
- ABNT NBR 15575-1:2021 section 11,4 (thermal performance by simulation) and its public amendment draft (LabEEE, March 2021) - https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/P_ABNTNBR15575_1_2020CNGPR_PosCN_SiteLabEEE.pdf

Radiance

Usado para: Conferência da luz natural do motor rápido: sDA300/50%, ASE1000,250, lux médio e pontos de luz natural do LEED (seção 8,1).

Parâmetros:

- Coeficientes de luz natural em duas fases (rfluxmtx), 4 reflexões
- Céu de Perez construído a partir do arquivo climático (gendaymtx), 2,305 trechos de céu, 8,760 horas
- Regra de persianas por ambiente: persianas fechadas (transmitância de 5%) quando mais de 2% do ambiente recebe 1,000 lux de sol direto
- Transmitância do vidro de 0,80 para toda a abertura; sem mobiliário, caixilhos, vizinhos nem árvores

Fórmulas:

- Iluminância no sensor = $\Sigma (\text{coeficiente de luz natural} \times \text{luminância do trecho de céu})$, somada nos 2,305 trechos em cada hora
- sDA e ASE como definidos na IES LM-83 (mesmas definições do motor rápido)

Referências:

- Radiance Synthetic Imaging System (Lawrence Berkeley National Laboratory) - <https://www.radiance-online.org>
- CIE 171:2006 Test cases to assess the accuracy of lighting computer programs - <https://cie.co.at/publications/test-cases-assess-accuracy-lighting-computer-programs>
- Perez et al. (1993): all-weather model for sky luminance distribution - [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90017-I](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90017-I)
- ANSI/IES LM-83-23: sDA and ASE - <https://webstore.ansi.org/standards/iesna/ansiieslm8323>

OpenFOAM (CFD)

Usado para: Coeficientes de pressão do vento (C_p) à frente de cada janela, porta e abertura de beiral, para 24 direções do vento; alimentam o AirflowNetwork do EnergyPlus (seções 6,4 e 6,5).

Parâmetros:

- RANS incompressível permanente (simpleFoam), modelo de turbulência k-epsilon padrão, funções de parede
- Entrada com camada limite atmosférica: 10 m/s a 10 m, comprimento de rugosidade $z_0 = 0,3 \text{ m}$ (suburbano)
- Domínio de 6H a montante, 15H a jusante, 5H de cada lado, 6H acima ($H = \text{altura da edificação}$); snappyHexMesh, células de 0,15 m na casa, mais grossas em volta dos muros do lote e dos vizinhos
- Entorno: muros do lote e edificações vizinhas como caixas fechadas com alturas estimadas por fotografias
- Convergência: resíduos p 1e-5, U 1e-6, k e epsilon 1e-5; a pressão é a média das últimas 20 iterações

Fórmulas:

- $C_p = p \div (\frac{1}{2} \rho U_{EP}(z)^2)$, com $U_{EP}(z) = U_{10} \times (z \div 10)^{0,22}$ o perfil de vento que o EnergyPlus usa
- $C_p(\text{EnergyPlus}) = C_p(\text{CFD}) \times (U_{CFD}(z) \div U_{EP}(z))^2$, a correção pela diferença de perfis de vento (fator de 0,39 a 0,79 conforme a altura)
- Quantidade de movimento com média de Reynolds: $\nabla \cdot (U U) = -\nabla p / \rho + \nabla \cdot [(v + v_t)(\nabla U + \nabla U^T)]$, com $v_t = C_\mu k^2 \div \epsilon$ e $C_\mu = 0,09$

Referências:

- OpenFOAM v2312 (OpenCFD / ESI Group), computational wind engineering with RANS k-epsilon - <https://www.openfoam.com>
- EN 1991-1-4: Eurocode 1, wind actions (table 7,1, pressure coefficients of vertical walls of rectangular buildings) - <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu>
- EnergyPlus AirflowNetwork and surface-averaged wind pressure coefficients of Swami and Chandra (1987), EnergyPlus Engineering Reference - <https://energyplus.net/documentation>

Software utilizado

Python 3,11,9 · NumPy 2,4,6 · pandas 3,0,6 · pvlib 0,16,1 · trimesh 5,1,1 · Embree (embreeex) 4,4,0 · IfcOpenShell 0,9,0 · Shapely 2,2,0 · Numba 0,68,0 · Matplotlib 3,11,2 · SciPy 1,17,1 · EnergyPlus 26,2,0 · Radiance 6,0,2 · OpenFOAM v2312 (Docker)

Etapas de cálculo e a confiança em cada uma

Etapas	Como é calculado	Confiabilidade
Modelo 3D e orientação	O edifício é lido de um arquivo IFC (IfcOpenShell). Os ambientes são os volumes IfcSpace; paredes, lajes, telhados, janelas e portas viram malhas de triângulos. O modelo é girado para que o norte verdadeiro venha do Norte Verdadeiro do IFC (mais uma correção opcional). Por quê: Tão exato quanto o modelo: tamanhos, posição das janelas e materiais são estimativas, a menos que o modelo venha de um levantamento.	Alta
Posição do sol e sombras	Posição solar para cada uma das 8,760 horas com o pvlib (algoritmo baseado no NREL SPA). A partir de uma grade de pontos sensores (0,5 m, a 0,76 m de altura) em cada ambiente, traça-se um raio em direção ao sol contra todos os elementos opacos com o Embree (biblioteca de traçado de raios): bloqueado = sombra; um raio que passa por uma janela é atenuado pela transmitância dela. Por quê: A geometria do sol é determinística; o resultado só é tão bom quanto a geometria (vizinhos e árvores só contam se estiverem no modelo).	Alta
Clima	Um ano meteorológico típico com dados horários (epw do EnergyPlus, como o TMYx do climate.onebuilding.org, ou um ano típico do PVGIS): temperatura, umidade, radiação direta/difusa/global, velocidade e direção do vento. Por quê: Um ano típico não é uma previsão: anos reais são mais quentes ou mais frios. Os dados de vento são de terreno aberto a 10 m.	Média
Luz natural (lux e lumens)	Iluminância no plano de trabalho = sol direto (traçado de raios) + luz do céu (céu isotrópico, fator de visão do céu por traçado de raios) + componente inter-refletida (método do fluxo dividido, refletância média 0,55). A radiação é convertida em lux com eficácias luminosas de 100 lm/W (direta) e 115 lm/W (difusa). Os lumens das lâmpadas usam o método dos lumens: lux x área / (utilização 0,45 x manutenção 0,8). Métricas: lux no centro do ambiente da NBR 15575, sDA300/50% e ASE1000,250 (IES LM-83), horas de sol da EN 17037. Por quê: O céu isotrópico ignora o céu mais claro perto do sol e o fluxo dividido superestima a luz no fundo dos ambientes: a conferência com o Radiance dá sDA ponderado de 6% contra 41% aqui. Use-o só para comparações rápidas.	Média
Motor de referência para luz natural: Radiance	Os mesmos ambientes e pontos de medição são recalculados com o Radiance (Lawrence Berkeley National Laboratory), um traçador de raios reverso validado nos casos de teste da CIE 171:2006 e o motor por trás do ClimateStudio e do Honeybee. Método: coeficientes de luz natural em duas fases (rfluxmtx, 4 reflexões) multiplicados por um céu de Perez construído a partir do arquivo climático (gendaymtx, 2,305 trechos de céu) nas 8,760 horas; sDA300/50% e ASE1000,250 como na IES LM-83, com a regra de persianas aproximada por ambiente (persianas fechadas, transmitância de 5%, quando mais de 2% do ambiente recebe 1,000 lux de sol direto). Um sensor acima do telhado confere o céu: ele reproduz a iluminância do arquivo climático com diferença de cerca de 2%. Por quê: Motor validado; o que ainda falta na rodada é mobiliário, caixilhos, a treliça da porta de vidro, vizinhos e árvores, e a regra de persianas é simplificada. Prefira estes números aos do motor rápido de luz natural.	Alta
Motor de referência para calor e energia: EnergyPlus	Os pacotes de melhoria são recalculados com o EnergyPlus (Departamento de Energia dos EUA), o motor de balanço de calor validado pela norma ASHRAE 140 e usado dentro do DesignBuilder e do OpenStudio. Uma zona por ambiente mais uma zona de forro ventilado acima dele; paredes compartilhadas entre ambientes; funções de transferência de condução para cada camada; janelas como sistemas de vidro simples; os beirais reais como superfícies de sombra; ventilação das janelas por vento e empuxo (janelas 50% abertas quando o ar externo está mais frio e acima de 18 C); um ar-condicionado ideal com o mesmo ponto de ajuste, horários e COP do motor rápido. O conforto vem de uma rodada sem climatização (adaptativo da ASHRAE 55) e a energia de uma segunda rodada com o ar-condicionado. Por quê: Motor validado, mas o modelo é simplificado: telhado plano com o mesmo volume de forro, sem ganhos internos, sem abertura de portas, sem sombra de vizinhos, propriedades do vidro supostas, sem calibração com medições. Compare opções; não trate a conta como previsão.	Média
NBR 15575-1:2021 por simulação e ventilação cruzada (EnergyPlus + AirflowNetwork)	Um modelo real e um modelo de referência da casa são simulados nas 8,760 horas com o EnergyPlus. A ventilação natural é resolvida pela rede de fluxo de ar (AirflowNetwork): janelas, portas abertas e frestas são caminhos de ar movidos pela pressão do vento (coeficientes de fachada de Swami e Chandra para edificação baixa, velocidade local do vento na altura da abertura), pelo efeito chaminé e pela altura da abertura; as janelas abrem só com o ambiente ocupado, com o ar a pelo menos 19 C e mais quente que o externo; as janelas dos banheiros ficam abertas. Ocupação, iluminação e equipamentos seguem as tabelas da norma; uma segunda rodada com as janelas fechadas e ar-condicionado ideal (refrigeração a 23 C / aquecimento a 21 C quando ocupado) dá a carga térmica. PHFT, temperaturas operativas máxima e mínima e redução da carga dão os níveis mínimo, intermediário e superior. Por quê: Segue a seção 11,4 da NBR 15575-1:2021 (texto integral, tabelas conferidas com o projeto público de emenda); a zona bioclimática de Maringá na NBR 15220-3:2024 vem de um artigo não oficial; nossas suposições estão listadas no relatório (ambientes transitórios, portas abertas, temperatura do solo). Os coeficientes de pressão do vento vêm do CFD do OpenFOAM desta casa com seus muros e vizinhos (alturas estimadas), não de um ensaio em túnel de vento. Não é um laudo oficial de conformidade.	Média
Circulação do ar, alterações da planta e exaustão do ar quente (EnergyPlus + AirflowNetwork)	A mesma rede de fluxo de ar é simulada no ano inteiro com várias alterações da planta (portas fechadas, grelha acima das portas, janelas de abrir, exaustão pelo forro). A vazão por cada janela, porta, grelha e abertura do forro é lida hora a hora e tirada a média das horas com janelas abertas, das horas quentes e de cada direção do vento, o que dá as setas na planta. A efetividade de exaustão compara a temperatura operativa de cada ambiente com uma simulação de janelas fechadas e com a temperatura externa; o calor retirado pelo ar é rho cp V (T zona - T externa). Por quê: As vazões são médias entre ambientes (um nó de ar por ambiente, sem campo de velocidade e sem idade do ar ou zonas de estagnação); a pressão do vento vem do CFD só do exterior, com as aberturas fechadas, e a grelha, a abertura do forro e a fração das janelas de abrir são tamanhos idealizados, não produtos. Bom para ordenar alterações da planta (as diferenças entre variantes são mais confiáveis que as vazões absolutas); não substitui um CFD interno nem um teste de fumaça.	Média
Pressão do vento nas fachadas: OpenFOAM (CFD)	Para cada uma de 24 direções de vento (a cada 15 graus) a casa (invólucro fechado reconstruído dos telhados, beirais e varandas do IFC) é colocada em um domínio de cálculo (6H a montante, 15H a jusante, 5H nas laterais, 6H acima, H = altura da edificação) e malhada com o snappyHexMesh (1,2 a 2,0 milhões de células, 0,15 m na casa, mais grossas em volta dos muros do lote e dos vizinhos). O OpenFOAM v2312 resolve as equações de Navier-Stokes com média de Reynolds em regime permanente, com o modelo de turbulência k-epsilon padrão, entrada com camada limite atmosférica (10 m/s a 10 m, comprimento de rugosidade 0,3 m) e funções de parede para solo rugoso. Os muros do lote e as edificações vizinhas entram como caixas fechadas (alturas estimadas por fotografias). A pressão 0,3 m à frente de cada janela, porta e abertura de beiral, convertida em coeficiente da pressão dinâmica do perfil de vento do EnergyPlus (lei de potência, terreno suburbano) naquela altura, dá os coeficientes de pressão entregues à rede de fluxo de ar do EnergyPlus. Uma verificação numérica (três malhas, rugosidade, tamanho do domínio, uma caixa comparada com o Eurocódigo) dá a incerteza de cada coeficiente. Roda em um contêiner Docker. Por quê: O RANS k-epsilon é o modelo de engenharia usual para cargas médias de vento em edificações e o OpenFOAM é validado para ele, mas esta rodada usa a forma real do telhado, os muros do lote e os vizinhos com alturas estimadas por fotografias, sem árvores, uma única rugosidade de aproximação e malha de tamanho moderado; não houve conferência com túnel de vento.	Média
Temperatura interna (modelo térmico)	Cada ambiente é um modelo de balanço térmico concentrado resolvido hora a hora (Python, compilado com Numba): camadas de parede, forro e piso como nós de armazenamento de calor (resistências e capacidades a partir da condutividade, densidade, calor específico e espessura, no estilo ISO 6946 / NBR 15220-2), temperatura sol-ar nas superfícies externas, sótão ventilado, janelas (U e ganho solar), ventilação (infiltração com tudo fechado, ventilação cruzada pelo vento com janelas abertas, ambientes ligados por portas) e massa térmica. Temperatura operativa = média da temperatura do ar e das superfícies. O conforto usa o modelo adaptativo da ASHRAE 55 (aceitabilidade de 80% e 90%) e as verificações de dia mais quente/frio da NBR 15575. Por quê: Um modelo simplificado de uma zona por ambiente, não calibrado com medições. Foi conferido contra o EnergyPlus nos pacotes de melhoria (veja a etapa do EnergyPlus): os motores concordam na ordem das medidas, mas o EnergyPlus dá cerca de metade da energia de ar-condicionado. Use-o para comparações rápidas, não como previsão exata.	Média
Energia e custo de ar-condicionado / aquecimento	Quando o ambiente fica acima da temperatura de refrigeração (ou abaixo da de aquecimento) no seu horário de uso, o modelo soma o fluxo de calor necessário para manter a temperatura; eletricidade = calor / COP (refrigeração) ou combustível = calor / eficiência (aquecimento), custo = energia x tarifa. As janelas ficam fechadas com o equipamento ligado. Só calor sensível; sem calor de pessoas, aparelhos ou iluminação. Por quê: As contas reais diferem: carga latente, hábitos dos moradores, eficiência do equipamento e a tarifa (uma suposição) importam. Trate o custo como ordem de grandeza e como forma de comparar opções.	Baixa
Vento e ventilação cruzada	Rosas dos ventos do arquivo climático; cada janela é classificada como a barlavento / sotavento / lateral a cada hora; ambientes cujas janelas conectadas ficam de frente para o vento e para o lado oposto recebem mais trocas de ar. Sem cálculo de pressão (o CFD e o AirflowNetwork são usados só na seção 6,4). Por quê: Uma estimativa por regras: o vento na casa é menor e mais turbulento que na estação; não há cálculo de escoamento por pressão.	Baixa
Cenários de melhoria	Cada melhoria altera o modelo-base e o ano inteiro é simulado de novo: o isolamento do telhado soma uma camada de condução (espessura / condutividade) no lado do sótão do forro; a vedação reduz a taxa de trocas de ar com a casa fechada; o vidro altera o U da janela, o fator de ganho solar e a transmitância visível; o brise fixo corta o sol direto pela profundidade da sombra = beiral x tan(ângulo de perfil); persianas móveis multiplicam o ganho solar por 0,3 sempre que o sol na janela passa de 250 W/m2 durante o dia. Por quê: Bom para ordenar opções (as diferenças entre cenários são mais confiáveis que os valores absolutos). As propriedades dos materiais são valores de catálogo; a confiança de cada valor aparece ao lado dele. O sombreamento é analítico, não por traçado de raios.	Média

Referências

- pvlb python: a Python package for modeling solar energy systems (Holmgren, Hansen, Mikofski, JOSS 2018) - <https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.00884>
- PVGIS typical meteorological year (European Commission JRC) - https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
- Climate.OneBuilding.Org: TMYx weather files - <https://climate.onebuilding.org>
- Embree ray-tracing kernels (Intel) - <https://github.com/embree/embree>
- IfcOpenShell: open-source IFC toolkit - <https://ifcopenshell.org>
- Numba: JIT compiler for Python - <https://numba.pydata.org>
- ASHRAE Standard 55: thermal environmental conditions for human occupancy (adaptive comfort model) - <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines>
- ABNT NBR 15575 (Residential buildings - performance) and NBR 15220 (Thermal performance of buildings) - <https://www.abntcatalogo.com.br>
- EN 17037: Daylight in buildings - <https://standards.cencenelec.eu>
- Radiance Synthetic Imaging System (Lawrence Berkeley National Laboratory) - <https://www.radiance-online.org>
- CIE 171:2006 Test cases to assess the accuracy of lighting computer programs - <https://cie.co.at/publications/test-cases-assess-accuracy-lighting-computer-programs>
- EnergyPlus (US Department of Energy, NREL) - <https://energyplus.net>
- ANSI/ASHRAE Standard 140: Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs - <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-140>
- Perez et al. (1993): all-weather model for sky luminance distribution - [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90017-I](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90017-I)
- EnergyPlus AirflowNetwork and surface-averaged wind pressure coefficients of Swami and Chandra (1987), EnergyPlus Engineering Reference - <https://energyplus.net/documentation>
- ABNT NBR 15575-1:2021 section 11.4 (thermal performance by simulation) and its public amendment draft (LabEEE, March 2021) - https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/P_ABNTNBR15575_1_2020CNGPR_PosCN_SiteLabEEE.pdf
- OpenFOAM v2312 (OpenCFD / ESI Group), computational wind engineering with RANS k-epsilon - <https://www.openfoam.com>
- ANSI/IES LM-83-23: sDA and ASE - <https://webstore.ansi.org/standards/iesna/ansiieslm8323>
- USGBC LEED v4,1 Daylight credit (Option 1: simulation) - <https://leeduser.buildinggreen.com/credit/Ci-v4.1/EQc7>
- AIVC: air infiltration reduction by weatherstripping retrofits - <https://www.aivc.org/resource/reduction-air-infiltration-due-window-and-door-retrofits-older-home>
- WHO Housing and Health Guidelines (2018) - <https://www.who.int/publications/i/item/9789241550376>
- EN 1991-1-4: Eurocode 1, wind actions (table 7.1, pressure coefficients of vertical walls of rectangular buildings) - <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu>

10. Premissas, limites e fontes

- As **dimensões** vêm do modelo 3D fornecido: uma varredura em vídeo mais o anúncio; isto não é um levantamento topográfico.
- Os **materiais**: o bloco cerâmico padrão brasileiro de 8 furos com reboco e uma cobertura de telha cerâmica com forro de laje de concreto, não confirmados para esta casa. Prédios vizinhos, árvores da rua e cortinas não são modelados, a menos que estejam no modelo.
- As **portas** são supostas abertas para luz e ar. Móveis, pessoas, eletrodomésticos e calor da iluminação não estão incluídos (casa vazia).
- O modelo de conforto é um balanço térmico horário simplificado, não calibrado com medições: use-o para comparar ambientes e opções. O EnergyPlus seria o próximo nível de rigor.
- Os dados de **vento** são de terreno aberto a 10 m; dentro de um lote com muros e vizinhos as velocidades são menores. A regra de vento do motor rápido ignora isso; a ventilação por pressão da seção 6,4 inclui os muros e vizinhos pelo CFD, com alturas estimadas.
- A **luz natural** usa um céu isotrópico; céus reais parcialmente nublados são mais claros perto do sol.
- As escalas marcadas *Regra prática* são nossas; as marcadas como norma vêm dos documentos listados abaixo. Vários valores de norma foram lidos de resumos públicos e projetos de emenda: confirme-os nos textos completos da ABNT antes de usá-los em decisão legal, contratual ou de financiamento.

Fontes

- ABNT NBR 15575-1:2013 (Edificações habitacionais — Desempenho), requisitos de iluminação natural e desempenho térmico
- ABNT NBR 15575-1:2021 + emenda (desempenho térmico por simulação, comparado a uma casa de referência)
- Projeto de emenda da ABNT NBR 15575-4:2021 (mar/2021): método simplificado para paredes, ventilação e áreas transparentes
- Projeto de emenda da ABNT NBR 15575-5:2021: método simplificado para coberturas
- ABNT NBR 15220-3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas (Maringá costuma ser listada na zona 3)
- ABNT NBR 5413:1992 (cancelada em 2013, mas ainda a referência brasileira mais usada para iluminação de RESIDÊNCIAS)
- ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013 (iluminação de ambientes de trabalho; leitura e escrita 300–500 lx)
- EN 17037:2018 Iluminação natural em edifícios (Anexo Nacional do Reino Unido para moradias: 100/150/200 lx; insolação 1,5/3/4 h)
- IES LM-83-12 (sDA e ASE), como usado no LEED v4,1
- ASHRAE 55, modelo de conforto adaptativo (aceitabilidade de 80% / 90%)
- ABNT NBR 16401-2 (ar-condicionado, conforto interno): verão cerca de 22,5–25,5 °C com 65% de UR e 23–26 °C com 35% de UR
- Passive House Institute, critério: demanda de aquecimento de no máximo 15 kWh por m² por ano
- USGBC LEED v4,1, crédito de Luz natural, Opção 1 (simulação): média de sDA300/50% de 40% / 55% / 75% = 1 / 2 / 3 pontos; ASE1000,250 acima de 10% exige estratégia contra ofuscamento (limites lidos na página do crédito v4,1 no LEEDuser)
- ANSI/IES LM-83-23 (publicada em fev/2023): autonomia espacial de luz natural (sDA) e exposição solar anual (ASE); o LEED v4,1 ainda cita a edição de 2012, com as mesmas duas métricas
- OMS, Diretrizes de Habitação e Saúde 2018 (temperatura interna de pelo menos 18 °C)
- Escala de vento Beaufort (OMM)
- Regra prática deste estudo (nenhuma norma dá um número)

Rode de novo depois de mudar o modelo

Edite o modelo 3D (house.ifc) e dê dois cliques em **run_all.bat** na pasta House3D. Ele refaz a simulação, este PDF e os dados do visualizador 3D (viewer / open_viewer.bat).