

Influência de estratégias passivas na carga térmica e no dimensionamento da climatização de uma edificação comercial: estudo de caso em escritório

Influence of passive strategies on cooling load and air-conditioning sizing in a commercial building: an office case study

Luis Henrique Moreira da Silva¹

RESUMO

O desempenho térmico de edificações comerciais é influenciado pelas características construtivas, pela exposição solar, pela ocupação e pelas cargas internas provenientes de iluminação e equipamentos. Este estudo teve como objetivo avaliar quantitativamente a influência de estratégias passivas sobre a carga térmica e o dimensionamento da climatização de um escritório existente localizado em Quatiguá-PR. A pesquisa foi desenvolvida por meio de estudo de caso de abordagem quantitativa, considerando as características geométricas e construtivas da edificação, ocupação, equipamentos, iluminação, superfícies envidraçadas e capacidade de climatização instalada. Foram avaliados cenários envolvendo aplicação de película de controle solar, sombreamento externo por toldo, redução da absortância da fachada por meio de pinturas claras e combinação dessas estratégias. Na condição atual, a carga térmica global foi estimada em aproximadamente 40.450 BTU/h, frente a uma capacidade nominal instalada de 32.000 BTU/h. A combinação de película de controle solar e toldo reduziu a carga estimada em 19,1%, enquanto a alteração da pintura externa para tonalidades claras apresentou reduções entre 9,0% e 11,3%. Os cenários combinados apresentaram os melhores resultados, com redução de 28,1% para acabamento claro e 30,4% para pintura branca, alcançando carga global mínima

¹Centro Universitário das Faculdades Integradas de Ourinhos-Unifio

de aproximadamente 28.150 BTU/h na condição-base do modelo, antes da contribuição adicional da laje superior. Conclui-se que intervenções passivas relativamente simples e compatíveis com retrofit podem reduzir significativamente a solicitação térmica de edificações comerciais existentes e contribuir para melhor adequação entre a demanda térmica e a capacidade de climatização disponível.

Palavras-chave: Carga térmica. Estratégias passivas. Climatização. Desempenho térmico. Edificações comerciais.

ABSTRACT

The thermal performance of commercial buildings is influenced by construction characteristics, solar exposure, occupancy, and internal heat gains from lighting and equipment. This study aimed to quantitatively evaluate the influence of passive strategies on the cooling load and air-conditioning sizing of an existing office building located in Quatiguá, Paraná, Brazil. The research was developed as a quantitative case study considering the building geometry and construction characteristics, occupancy, equipment, lighting, glazed surfaces, and installed air-conditioning capacity. Different scenarios were evaluated, including solar-control window film, external shading using an awning, reduction of façade solar absorptance through lighter exterior finishes, and combinations of these strategies. Under the existing condition, the overall cooling load was estimated at approximately 40,450 BTU/h, compared with a total installed nominal capacity of 32,000 BTU/h. The combination of solar-control film and external shading reduced the estimated load by 19.1%, while lighter exterior finishes resulted in reductions ranging from 9.0% to 11.3%. The combined scenarios achieved the best performance, with reductions of 28.1% for a light-colored finish and 30.4% for a white finish, reaching a minimum estimated cooling load of approximately 28,150 BTU/h under the baseline model condition, before any additional heat transfer through the upper slab. The results indicate that relatively simple passive retrofit strategies can significantly reduce the thermal demand of existing commercial buildings and contribute to a better balance between cooling requirements and installed air-conditioning capacity.

Keywords: Cooling load. Passive strategies. Air conditioning. Thermal performance. Commercial buildings.

INTRODUÇÃO

O desempenho térmico das edificações está relacionado à interação entre o clima, as características da envoltória, a ocupação, os equipamentos internos e os sistemas utilizados para manter condições adequadas de conforto. Em edificações comerciais, particularmente em escritórios, essa interação tende a ser complexa, pois os ganhos de calor provenientes de pessoas, iluminação, computadores e outros equipamentos somam-se às cargas externas associadas à radiação solar, à transmissão de calor por paredes, coberturas e superfícies envidraçadas e à renovação ou infiltração de ar. Como consequência, a necessidade de resfriamento não depende apenas da temperatura externa, mas também da forma como a edificação é construída e utilizada ao longo do período de ocupação.

A climatização artificial constitui uma solução amplamente utilizada para atender às condições térmicas internas, porém seu dimensionamento deve estar relacionado à carga térmica efetivamente imposta ao ambiente. Equipamentos selecionados exclusivamente por critérios simplificados, sem consideração das características construtivas, orientação, ocupação e cargas internas, podem apresentar capacidade incompatível com a demanda real. A ASHRAE (2025) destaca que o cálculo de cargas em edificações não residenciais deve representar adequadamente a edificação e suas condições de operação, evitando a acumulação indiscriminada de fatores de segurança que conduzam ao superdimensionamento.

Nesse contexto, estratégias passivas podem atuar antes do sistema mecânico, reduzindo parte dos ganhos térmicos que posteriormente precisam ser removidos pelo ar-condicionado. Elementos de proteção solar, propriedades térmicas da envoltória, características das aberturas e outras decisões construtivas alteram a transferência de calor entre o ambiente externo e o interior. Em escritórios brasileiros, estudos de simulação já demonstraram que parâmetros de fachada, percentual de áreas envidraçadas, tipo de vidro, sombreamento e temperatura de operação influenciam o consumo associado ao condicionamento de ar (BRUGNERA et al., 2019).

A proteção solar possui especial interesse por atuar diretamente sobre a radiação incidente nas aberturas e fachadas, reduzindo o ganho térmico antes de sua entrada no ambiente. Brugnera et al. (2019), ao avaliarem edifícios de

escritórios em diferentes climas brasileiros, observaram redução do consumo do sistema de ar-condicionado nos cenários com dispositivos de sombreamento analisados. Estudos mais recentes também reforçam que a configuração de janelas e elementos de proteção solar interfere no ganho solar, na ventilação e no desempenho energético de escritórios (YI; TANG; YEBOAH, 2024).

O desempenho da envoltória, por sua vez, depende tanto da resistência à transferência de calor quanto da capacidade das superfícies externas de absorver radiação solar. Em fachadas expostas, a cor e as propriedades ópticas do acabamento alteram a parcela de energia incidente que é absorvida pela parede e posteriormente transferida ao ambiente interno. Cores claras, com menor absorvância solar, tendem a reduzir esse ganho térmico, enquanto acabamentos escuros podem elevar a temperatura superficial. Em edifícios comerciais, essa relação deve ser analisada em conjunto com clima, orientação, transmitância da parede e cargas internas (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; MELO; LAMBERTS, 2008).

Diante disso, o presente estudo propõe uma análise quantitativa aplicada a uma edificação comercial existente, utilizada como escritório. Diferentemente de uma comparação exclusivamente conceitual entre estratégias térmicas, a pesquisa pretende utilizar as características reais da construção, da ocupação e dos equipamentos para calcular a carga térmica dos ambientes e verificar numericamente como intervenções passivas podem alterar a capacidade de refrigeração requerida.

A questão que orienta a pesquisa é: em que medida a adoção de estratégias passivas de proteção solar e melhoria do desempenho térmico da envoltória pode reduzir a carga térmica de um escritório existente e, conseqüentemente, modificar a capacidade de climatização necessária?

O objetivo geral é quantificar a influência de estratégias passivas selecionadas sobre a carga térmica e o dimensionamento da climatização de uma edificação comercial do tipo escritório. Como objetivos específicos, pretende-se: caracterizar as condições construtivas e de uso do escritório; estimar as cargas térmicas externas e internas dos ambientes climatizados; comparar a carga calculada com a capacidade nominal atualmente instalada; simular cenários de proteção solar das superfícies envidraçadas e de redução da absorção solar da fachada por meio de acabamentos mais claros; avaliar o efeito individual e

combinado dessas intervenções; e estimar a redução percentual da carga de resfriamento e suas possíveis implicações sobre o dimensionamento e a eficiência do sistema de climatização.

REFERENCIAL TEÓRICO

Conforto térmico e desempenho térmico em edificações comerciais

O conforto térmico corresponde à condição de satisfação do usuário em relação ao ambiente térmico e resulta da interação entre variáveis ambientais e individuais. Temperatura do ar, temperatura radiante, umidade e velocidade do ar interagem com fatores relacionados à atividade metabólica e ao vestuário, de modo que a avaliação do conforto não pode ser reduzida apenas à temperatura indicada por um termômetro (FROTA; SCHIFFER, 2001). Em edificações comerciais, a manutenção de condições internas adequadas apresenta relação direta com a permanência prolongada dos ocupantes e com a utilização de sistemas de climatização durante o período de trabalho.

O desempenho térmico da edificação está associado à capacidade de sua envoltória e de seus sistemas de responder às condições externas e internas. Paredes, coberturas, pisos, esquadrias e elementos transparentes controlam parte das trocas de calor, enquanto o uso do edifício introduz fontes adicionais de energia no ambiente. Lamberts, Dutra e Pereira (2014) destacam que decisões arquitetônicas e construtivas influenciam o comportamento térmico e energético, sendo necessário considerar clima, orientação, geometria, propriedades dos materiais, aberturas e estratégias de condicionamento como partes de um mesmo sistema.

Em escritórios, o comportamento térmico também é influenciado pela densidade de ocupação e pela presença de equipamentos elétricos. Computadores, monitores, impressoras, iluminação e demais aparelhos convertem parcela significativa da energia elétrica utilizada em calor liberado no espaço. Dessa forma, mesmo ambientes com envoltória relativamente protegida podem apresentar demanda de resfriamento relevante durante o horário de funcionamento, principalmente quando as cargas internas são elevadas.

Carga térmica e dimensionamento da climatização

A carga térmica de resfriamento representa a taxa de remoção de calor necessária para manter um ambiente nas condições internas estabelecidas para o projeto. Para seu cálculo, devem ser consideradas as diferentes formas pelas quais a energia térmica alcança ou é gerada no espaço. Em edificações não residenciais, a ASHRAE (2025) organiza a análise a partir de informações climáticas, características da envoltória, superfícies transparentes, ventilação e infiltração, ocupação, iluminação e equipamentos.

É importante diferenciar ganho de calor e carga de resfriamento. Nem toda energia que ingressa no ambiente converte-se imediatamente em carga sobre o sistema de climatização. Parte dos ganhos, principalmente os de natureza radiante, pode ser absorvida por superfícies e pela massa térmica interna e posteriormente liberada por convecção. Essa defasagem temporal faz com que a carga máxima de resfriamento dependa não apenas da intensidade dos ganhos, mas também de seu horário de ocorrência e da capacidade térmica dos elementos da edificação (ASHRAE, 2025).

Para fins de organização do estudo, a carga total pode ser representada pela soma das principais parcelas térmicas consideradas na análise:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{envoltória}} + Q_{\text{solar}} + Q_{\text{ocupantes}} + Q_{\text{iluminação}} + Q_{\text{equipamentos}} + Q_{\text{ar}}$$

Nessa expressão, as parcelas representam, de forma geral, as trocas de calor pela envoltória opaca, os ganhos solares pelas superfícies expostas e transparentes, o calor liberado pelos ocupantes, a iluminação, os equipamentos e as trocas associadas à renovação ou infiltração de ar. O método definitivo de cálculo e os parâmetros utilizados para cada parcela serão definidos na etapa aplicada, de acordo com os dados disponíveis para o escritório e com o nível de detalhamento adequado ao estudo.

O dimensionamento do sistema de climatização deve decorrer da carga calculada e das condições de projeto, e não apenas da área de piso. Regras práticas baseadas exclusivamente em BTU/h por metro quadrado podem ser úteis para estimativas preliminares, mas não representam adequadamente diferenças de orientação, insolação, materiais, número de usuários, equipamentos, aberturas e horários de utilização. Para um estudo acadêmico, a decomposição da carga em

parcelas possibilita identificar quais elementos contribuem de forma mais significativa e quais intervenções apresentam maior potencial de redução.

Ganhos térmicos externos e internos em escritórios

Os ganhos térmicos externos são provenientes principalmente da transferência de calor através de paredes, coberturas, portas e superfícies envidraçadas, além da radiação solar incidente nas fachadas e janelas. Sua magnitude varia conforme orientação, horário, propriedades térmicas dos materiais, cor e absorvância das superfícies, área exposta e diferença entre as condições externas e internas. Em edificações comerciais brasileiras, parâmetros da envoltória exercem influência significativa sobre o consumo associado ao condicionamento de ar (MELO; LAMBERTS, 2008; CARVALHO; LA ROVERE; GONÇALVES, 2010).

As superfícies transparentes merecem atenção por permitirem simultaneamente transmissão de calor e entrada de radiação solar. A proporção de área envidraçada, as propriedades do vidro e a existência de dispositivos de sombreamento podem alterar significativamente os ganhos de calor. Brugnera et al. (2019) verificaram, em simulações de escritórios para diferentes climas brasileiros, que parâmetros relacionados às aberturas influenciaram o desempenho energético e que os dispositivos de sombreamento reduziram o consumo do ar-condicionado em todos os cenários avaliados no estudo.

Os ganhos internos decorrem das atividades desenvolvidas no ambiente. Os ocupantes liberam calor sensível e latente; a iluminação converte grande parte da energia consumida em calor; e equipamentos de escritório, eletrodomésticos e dispositivos eletrônicos contribuem continuamente para o aquecimento interno. Em um escritório contemporâneo, computadores e monitores podem permanecer ligados por várias horas consecutivas, tornando inadequado desprezar sua contribuição durante o dimensionamento.

A análise conjunta dessas parcelas é especialmente importante para o presente estudo, pois o escritório considerado possui equipamentos de informática, iluminação e outros aparelhos elétricos que não podem ser isolados diretamente a partir da conta geral de energia. Entretanto, para o cálculo de carga térmica não é necessário separar o consumo total da edificação por circuito: as

potências nominais, quantidades e horários de utilização dos equipamentos podem ser utilizadas para estimar sua contribuição térmica de forma independente.

Proteção solar como estratégia de redução de carga térmica

A proteção solar tem como princípio reduzir a incidência direta da radiação sobre superfícies da edificação, especialmente áreas envidraçadas. Brises, beirais, marquises, venezianas, persianas externas e outros elementos podem impedir que parte da radiação alcance o vidro ou a fachada, diminuindo o ganho térmico antes que a energia precise ser removida pelo sistema de climatização.

A eficiência do sombreamento depende da orientação da abertura, trajetória solar, geometria do dispositivo e período de exposição. Por isso, uma mesma solução não produz necessariamente o mesmo resultado em fachadas distintas. Em escritórios, Yi, Tang e Yeboah (2024) demonstraram que variações na configuração de janelas e sombreamento alteram o ganho solar e o desempenho energético, reforçando a importância de avaliar a proteção em função das características geométricas e de orientação do edifício.

No contexto brasileiro, Brugnara et al. (2019) avaliaram diferentes soluções de fachada em escritórios e identificaram redução do consumo associado ao ar-condicionado com o uso de dispositivos de sombreamento nas configurações estudadas. Esses resultados sustentam a utilização da proteção solar como um dos cenários de intervenção do presente artigo, uma vez que sua aplicação pode ser simulada sem alterar as cargas internas de ocupação, iluminação e equipamentos, permitindo observar especificamente o efeito da redução dos ganhos solares.

Desempenho térmico da envoltória e influência da cor

O desempenho térmico de uma parede externa não depende apenas de sua transmitância térmica. Em superfícies expostas à radiação solar, a absorptância do acabamento externo determina a fração da energia incidente que é absorvida pela fachada. Quanto maior a absorptância, maior tende a ser o aquecimento superficial e, conseqüentemente, a solicitação térmica sobre a vedação. Lamberts, Dutra e

Pereira (2014) destacam que propriedades ópticas da superfície devem ser consideradas juntamente com a composição construtiva, a orientação e o clima.

A influência da cor é especialmente relevante em fachadas diretamente expostas. Acabamentos claros apresentam, em geral, menor absorção solar do que superfícies escuras, reduzindo o ganho de calor associado à radiação. Entretanto, a cor visual não constitui, isoladamente, uma propriedade térmica precisa, pois diferentes tintas de tonalidade semelhante podem apresentar comportamentos distintos. Assim, valores de absorção utilizados em cálculos devem ser entendidos como referências representativas quando não existe medição específica do produto aplicado.

No presente estudo, optou-se por avaliar uma intervenção compatível com uma edificação existente: a substituição do acabamento externo cinza escuro por cores de menor absorção, sem alteração da composição da parede. Foram simuladas uma condição de cor clara, representada por absorção solar de 0,30, e uma condição branca, com absorção de 0,20. Essa abordagem permite avaliar o efeito do acabamento superficial sem exigir demolição ou adição de camadas de isolamento à alvenaria existente.

Climatização artificial, capacidade instalada e eficiência energética

Os sistemas de climatização artificial possibilitam controlar a temperatura interna independentemente de parte das limitações impostas às estratégias passivas. Essa capacidade, entretanto, exige consumo de energia elétrica e torna o correto dimensionamento relevante tanto para o conforto quanto para a eficiência de operação. A capacidade nominal de refrigeração, normalmente apresentada em BTU/h ou kW, expressa a quantidade de calor que o equipamento é capaz de remover em determinadas condições e não corresponde diretamente à potência elétrica consumida.

Equipamentos com capacidade inferior à carga requerida podem apresentar dificuldade para atingir as condições internas desejadas nos períodos críticos. Por outro lado, o superdimensionamento também não deve ser tratado como solução ideal, pois pode aumentar o investimento inicial e produzir condições de operação desfavoráveis, especialmente quando o equipamento trabalha com ciclos e cargas muito diferentes daquelas consideradas em seu projeto. A ASHRAE (2025)

recomenda que os dados de entrada utilizados no cálculo sejam tão representativos quanto possível e alerta para o uso de fatores de segurança sucessivos que conduzam a cargas irreais.

No Brasil, o Programa Brasileiro de Etiquetagem permite consultar dados de desempenho dos condicionadores de ar registrados no Inmetro, incluindo informações relacionadas à capacidade, potência e eficiência. A etiquetagem atual utiliza indicadores que consideram o desempenho ao longo do ano e permite diferenciar equipamentos com tecnologias de operação variável, como compressores inverter (INMETRO, 2026). Quando os modelos dos aparelhos existentes no escritório forem identificados, esses dados poderão ser utilizados como complemento para a caracterização dos equipamentos.

A análise proposta neste artigo terá como foco principal a carga térmica e a capacidade necessária de refrigeração. Uma eventual estimativa de consumo de energia será tratada como análise complementar e dependerá da identificação dos modelos, potência elétrica, eficiência e tempo de funcionamento. Na ausência de submedição específica dos aparelhos, não será apresentado o consumo do ar-condicionado como valor medido diretamente, evitando atribuir ao sistema de climatização parcelas de energia consumidas por computadores, iluminação, geladeiras ou outros equipamentos.

Integração entre estratégias passivas e climatização artificial

A utilização de estratégias passivas e sistemas artificiais não deve ser compreendida como uma escolha obrigatoriamente excludente. Em edificações comerciais ocupadas durante várias horas do dia, condições climáticas e cargas internas podem tornar necessária a climatização mecânica mesmo quando a envoltória apresenta bom desempenho. Nesse caso, a função das estratégias passivas é reduzir a solicitação térmica sobre o sistema ativo.

A redução da carga térmica pode produzir dois efeitos de interesse: diminuir a potência de refrigeração necessária para atender ao pico de projeto e reduzir o esforço de operação do equipamento durante períodos de carga parcial. Dessa maneira, intervenções construtivas podem influenciar não apenas o conforto passivo, mas também a seleção e a operação dos sistemas de climatização.

Essa abordagem integrada fundamenta a comparação proposta neste artigo. O escritório existente será utilizado como cenário de referência, mantendo-se suas características reais de ocupação e uso. Em seguida, serão modificados apenas parâmetros associados às estratégias passivas analisadas, permitindo verificar quanto da carga calculada pode ser reduzida antes da atuação do sistema de ar-condicionado.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da pesquisa

A pesquisa foi de natureza aplicada, com abordagem predominantemente quantitativa e procedimento de estudo de caso. Foi analisada uma edificação comercial existente utilizada como escritório, a partir do levantamento de suas características geométricas, construtivas e operacionais. O estudo não teve como finalidade realizar uma auditoria energética completa da edificação, mas quantificar a carga térmica dos ambientes climatizados e avaliar numericamente o efeito de intervenções passivas selecionadas.

A metodologia foi dividida em cinco etapas: levantamento do escritório; definição das condições de cálculo; determinação da carga térmica do cenário atual; criação de cenários passivos alternativos; e comparação dos resultados. Os princípios de cálculo foram fundamentados em referências de transferência de calor e desempenho térmico de edificações, utilizando-se como referência principal para a estruturação das parcelas de carga os procedimentos apresentados para edificações não residenciais no ASHRAE Handbook – Fundamentals (ASHRAE, 2025). A ABNT NBR 16401-1:2024 foi utilizada como referência técnica complementar nos aspectos compatíveis com o porte e a configuração dos sistemas estudados.

Caracterização do estudo de caso

O estudo de caso foi realizado em uma edificação comercial existente utilizada como escritório, na qual o pesquisador exerce suas atividades profissionais. Para fins de análise térmica, a área climatizada foi dividida em três

zonas principais: recepção/sala de trabalho, sala administrativa 1 e sala administrativa 2. Essa divisão permitiu calcular as cargas térmicas individualmente e, posteriormente, avaliar o comportamento do conjunto, considerando também a comunicação existente entre os ambientes.

A recepção/sala principal apresenta dimensões internas aproximadas de 16,0 m de comprimento, 7,0 m de largura e 3,0 m de pé-direito, correspondendo a 112 m² de área de piso e 336 m³ de volume interno. O ambiente é ocupado habitualmente por cinco funcionários e pode receber clientes ao longo do expediente. Como cargas internas permanentes, foram identificados cinco computadores, três impressoras e nove lâmpadas tubulares de LED de 18 W, totalizando 162 W de potência instalada de iluminação. A climatização é realizada por dois condicionadores de ar LG com capacidade nominal de 9.000 BTU/h cada, resultando em 18.000 BTU/h de capacidade instalada nesse ambiente.

O acesso principal do escritório está localizado na fachada frontal e é constituído por uma porta de correr de vidro temperado escuro, com quatro folhas, aproximadamente 4,0 m de largura e 2,2 m de altura, totalizando 8,8 m² de superfície envidraçada. A porta permanece fechada durante a maior parte do expediente. A sala principal também possui duas pequenas janelas próximas aos equipamentos de climatização, com dimensão aproximada de 0,60 m em uma de suas direções, normalmente mantidas fechadas. Embora as aberturas permaneçam fechadas, suas superfícies transparentes foram consideradas na análise de transmissão e de ganhos solares.

As duas salas administrativas apresentam dimensões semelhantes, com aproximadamente 3,0 m × 3,0 m e pé-direito de 3,0 m, resultando em 9 m² de área e 27 m³ de volume por sala. Cada ambiente é ocupado habitualmente por uma pessoa e possui um computador, uma impressora e uma lâmpada tubular de LED de 18 W. Eventualmente, clientes são recebidos nessas salas. As portas internas permanecem normalmente abertas para a recepção, permitindo troca de ar entre os ambientes. Cada sala possui um condicionador de ar LG com capacidade nominal de 7.000 BTU/h.

Apesar de apresentarem a mesma geometria e capacidade de climatização, as duas salas possuem condições de envoltória distintas. Uma delas não apresenta janela externa. A outra, posicionada junto à fachada frontal, possui uma janela de vidro temperado escuro com aproximadamente 3,0 m de largura e 2,0 m de altura,

equivalente a 6,0 m² de área envidraçada. Essa abertura permanece normalmente fechada e possui cortina interna, porém a cortina é mantida aberta durante a rotina de trabalho. Essa diferença entre as duas salas permitiu avaliar a influência da superfície envidraçada e da exposição solar sobre a carga térmica em ambientes de dimensões e usos semelhantes.

A fachada principal está orientada aproximadamente para o norte, conforme verificação preliminar realizada por meio de bússola de smartphone. Durante o período da manhã, a incidência solar ocorre principalmente sobre a parede lateral voltada para a via pública, enquanto no período da tarde a radiação atinge com maior intensidade a fachada frontal, incluindo a porta envidraçada da recepção e a janela da sala administrativa frontal. A parede traseira e a lateral oposta encontram-se voltadas para o interior do terreno e permanecem predominantemente sombreadas pela residência adjacente ao longo do dia. Dessa forma, a análise dos ganhos solares concentrou-se especialmente na fachada frontal e na lateral exposta.

As paredes externas são constituídas por alvenaria de tijolos cerâmicos, com espessura total aproximada de 15 cm. Externamente, apresentam revestimento em argamassa e pintura em tom cinza escuro; internamente, possuem acabamento em massa e pintura em tonalidade clara, próxima ao branco. A cor externa escura foi considerada na caracterização da absorção da radiação solar das superfícies expostas. O teto dos ambientes é constituído por laje de concreto, sobre a qual existe uma residência, de modo que a superfície superior do escritório não corresponde a uma cobertura diretamente exposta à radiação solar.

A cozinha e os equipamentos nela existentes, incluindo refrigeradores e outros aparelhos, localizam-se em um cômodo separado e normalmente fechado, não sendo incorporados diretamente às cargas internas dos três ambientes climatizados. O escritório funciona das 7h30 às 12h00 e das 13h00 às 18h00. Em dias quentes, os condicionadores de ar permanecem ligados durante praticamente todo o expediente. Os quatro equipamentos são da marca LG e possuem aproximadamente oito anos de uso; como os modelos exatos não foram identificados, sua capacidade nominal foi utilizada como referência de comparação, sem assumir a eficiência elétrica atual dos aparelhos.

Considerando os três ambientes analisados, a área climatizada total é de aproximadamente 130 m² e o volume interno é de 390 m³. A ocupação habitual

corresponde a sete pessoas, sem considerar clientes ocasionais, e foram identificados sete computadores, cinco impressoras e 198 W de iluminação LED instalada. A capacidade nominal de refrigeração atualmente disponível é de 32.000 BTU/h, distribuída em 18.000 BTU/h na sala principal e 7.000 BTU/h em cada sala administrativa. Esses valores foram comparados com as cargas térmicas calculadas, não sendo considerados, por si só, como representação da demanda térmica real da edificação.

Tabela 1 - Síntese das características dos ambientes climatizados

Ambiente	Geometria	Uso e cargas internas	Aberturas e climatização
Recepção / sala principal	16,0 × 7,0 × 3,0 m	5 ocupantes; 5 computadores; 3 impressoras; 9 LEDs de 18 W	Porta de vidro 4,0 × 2,2 m; 2 pequenas janelas; 2 × 9.000 BTU/h
	112 m ² ; 336 m ³		
Sala administrativa 1	3,0 × 3,0 × 3,0 m	1 ocupante; 1 computador; 1 impressora; 1 LED de 18 W	Sem janela externa; porta interna normalmente aberta; 7.000 BTU/h
	9 m ² ; 27 m ³		
Sala administrativa 2 - frontal	3,0 × 3,0 × 3,0 m	1 ocupante; 1 computador; 1 impressora; 1 LED de 18 W	Janela de vidro 3,0 × 2,0 m; cortina normalmente aberta; 7.000 BTU/h
	9 m ² ; 27 m ³		

Fonte: Autor do projeto

Levantamento de dados

O levantamento de campo registrou as principais características geométricas, construtivas e operacionais dos ambientes climatizados. Foram medidos ou identificados as dimensões dos ambientes, o pé-direito, a orientação aproximada das fachadas, as dimensões e a posição das aberturas, a composição construtiva predominante, os padrões de ocupação, os horários de funcionamento, a quantidade de computadores e impressoras, a potência da iluminação LED e a capacidade nominal dos condicionadores de ar. Também foram registradas as condições de exposição solar das fachadas e a existência de sombreamento pelas edificações adjacentes. Os equipamentos localizados na cozinha, por permanecerem em ambiente separado e fechado, não foram incorporados às cargas internas das três zonas climatizadas analisadas.

Quando alguma propriedade necessária ao cálculo não estava disponível diretamente no levantamento, foi adotado valor de referência proveniente de norma, literatura técnica, documentação de fabricante ou base técnica reconhecida. Essas hipóteses foram

identificadas ao longo do método e mantidas constantes entre os cenários, de modo a preservar a comparabilidade dos resultados.

Determinação da carga térmica do cenário atual

A carga térmica foi calculada separadamente para cada zona climatizada. Foram consideradas as contribuições por transmissão através da envoltória, ganhos solares, ocupantes, iluminação, equipamentos e ar externo ou infiltração, conforme a disponibilidade de dados e o método de cálculo selecionado. As condições climáticas externas do projeto foram definidas a partir de estação climática representativa da região.

A análise foi conduzida de forma a evitar fatores de segurança acumulados em diferentes parcelas. Sempre que houve incerteza em algum dado, a hipótese adotada foi explicitada. O resultado do cenário atual foi apresentado em unidade de potência térmica e convertido, quando necessário, para permitir comparação com as capacidades nominais dos equipamentos existentes.

A comparação entre carga calculada e capacidade instalada foi utilizada como indicador de coerência do dimensionamento atual, mas não constituiu validação experimental do cálculo. A capacidade nominal instalada informa o limite de refrigeração dos aparelhos, enquanto a carga térmica representa uma estimativa da demanda do ambiente sob determinadas condições de projeto.

Cenários de intervenção

Após a determinação do cenário atual, foram simuladas modificações passivas, mantendo-se constantes, sempre que possível, ocupação, iluminação, equipamentos e condições internas. Dessa maneira, a diferença entre os resultados pôde ser atribuída às alterações construtivas analisadas.

Foram estruturados quatro grupos de cenários. O Cenário A representa a condição atual do escritório. O Cenário B avalia a proteção das superfícies envidraçadas e foi subdividido em B1, com película de controle solar; B2, com toldo externo sobre a fachada frontal; e B3, combinando película e toldo. O Cenário C avalia a redução da absorção solar da fachada, sendo o C1 correspondente à repintura em tom claro e o C2 à repintura branca. Por fim, o

Cenário D combina a alternativa B3 com os acabamentos C1 e C2, originando D1 e D2, respectivamente.

As intervenções foram formuladas como retrofits tecnicamente plausíveis para o escritório existente, mantendo inalteradas a ocupação, a iluminação, os equipamentos, a geometria e a condição interna do projeto. Para a película de controle solar adotou-se fator solar de 0,32 como referência de desempenho para aplicação sobre vidro monolítico tonalizado; para o toldo externo foi considerado bloqueio de 65 % do ganho solar direto incidente sobre a porta e a janela da fachada frontal durante o período crítico. Na avaliação das cores externas foram adotadas absorptâncias de 0,70 para a condição escura existente, 0,30 para a alternativa clara e 0,20 para a alternativa branca. Os valores representam hipóteses comparativas e devem ser confirmados por especificação de produto em uma eventual intervenção real (3M, 2026; U.S. DOE, 2016; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Tratamento e comparação dos resultados

Para cada cenário foram apresentados a carga térmica total, a carga por ambiente e a participação das principais parcelas no resultado. A redução proporcionada pelas estratégias foi calculada em relação ao cenário atual, permitindo identificar tanto o efeito isolado quanto o efeito combinado das intervenções.

A redução percentual da carga térmica foi determinada pela relação entre a carga do cenário de referência e a carga do cenário modificado. Além do valor percentual, discutiu-se se a alteração seria suficiente para modificar a faixa de capacidade de climatização necessária para algum dos ambientes.

Não foi realizada estimativa do consumo elétrico dos condicionadores de ar, pois o escritório não possui submedição exclusiva do sistema de climatização e os modelos exatos dos equipamentos instalados não foram identificados. Dessa forma, a análise permaneceu concentrada na carga térmica estimada e na capacidade nominal de refrigeração disponível, evitando atribuir ao sistema de climatização parcelas de consumo pertencentes a outros equipamentos da edificação.

Parâmetros adotados para o cálculo

A determinação da carga térmica do cenário atual foi desenvolvida como estimativa numérica comparativa, destinada à comparação entre a condição existente e os cenários passivos avaliados. O procedimento não substitui um projeto executivo de climatização pelo método completo de balanço térmico ou Radiant Time Series (RTS), pois algumas propriedades da edificação não foram medidas diretamente. Nessas situações, foram adotados valores de referência, explicitados a seguir, para que as hipóteses possam ser reproduzidas e posteriormente refinadas.

Como Quatiguá-PR não possui condição externa de projeto específica apresentada na tabela consultada da ABNT NBR 16401-1:2024, adotou-se, para esta etapa, Londrina-PR como referência normativa regional. Para o percentil de 0,4 %, foram considerados 34,0 °C de temperatura de bulbo seco e 21,7 °C de temperatura de bulbo úmido coincidente, com variação diária de 9,7 °C. A condição interna foi fixada em 24 °C e 50 % de umidade relativa, resultando em diferença de temperatura de 10 °C para as parcelas de transmissão em regime simplificado. A estação automática Joaquim Távora (A821), do INMET, foi identificada como referência meteorológica regional para eventual refinamento posterior com dados horários locais.

Para a parede de alvenaria cerâmica foi adotada transmitância térmica de 2,37 W/(m²·K), correspondente a uma composição de referência com bloco cerâmico e revestimentos de argamassa disponibilizada pelo ProjetEEE. Para a laje entre o escritório e a residência superior, utilizou-se como referência uma laje maciça de 10 cm, com transmitância de 3,74 W/(m²·K). Como o tipo e a espessura exatos do vidro não foram identificados, adotou-se provisoriamente comportamento compatível com vidro monolítico fumê de aproximadamente 6 mm, com transmitância térmica de 5,70 W/(m²·K) e fator solar de 0,60. Esses parâmetros foram tratados como hipóteses de cálculo, e não como propriedades medidas dos elementos existentes.

As cargas internas foram determinadas a partir da ocupação e dos equipamentos levantados. Para atividade sentada e trabalho muito leve em escritório, adotou-se ganho total de 117 W por pessoa. Para cada estação de

trabalho foi considerado um computador de mesa com pico médio de 82 W e fator de diversidade de 75 %, associado a um monitor de 21 W e fator de diversidade de 70 %, resultando em aproximadamente 76,2 W por posto. Para as impressoras foi utilizado pico médio de 142 W e fator de diversidade de 45 %, equivalente a aproximadamente 63,9 W por unidade. A iluminação foi considerada pela potência efetivamente levantada, de 18 W por lâmpada LED.

As parcelas de transmissão por elementos opacos e transparentes foram estimadas por $Q_{trans} = U \times A \times \Delta T$. Para o ganho solar pelos vidros foi utilizada a relação $Q_{solar} = A \times FS \times I$, sendo FS o fator solar do conjunto envidraçado e I a irradiância incidente adotada no cenário. Para as paredes opacas expostas à radiação foi incorporada uma parcela comparativa por meio do fator solar de elementos opacos, calculado por $FS_o = 4 \times U \times \alpha$, expresso em porcentagem, sendo α a absorptância solar da superfície. Essa expressão foi apresentada na ABNT NBR 15220-2:2005. Embora essa edição tenha sido posteriormente substituída pela ABNT NBR 15220-2:2022, a expressão foi mantida neste estudo exclusivamente como recurso comparativo para estimar o efeito relativo da absorptância superficial entre os cenários, e não como procedimento normativo vigente de dimensionamento. O ganho correspondente foi estimado por $Q_{solar,op} = A \times I \times FSo/100$. Na ausência de medição solar local no período de levantamento, foram adotados 300 W/m² para a fachada frontal aproximadamente norte e 500 W/m² para a lateral exposta ao sol da manhã. Esses valores são parâmetros comparativos e não medições meteorológicas do escritório.

$$Q_{trans} = U \times A \times \Delta T$$

$$Q_{solar} = A \times FS \times I$$

$$FS_o = 4 \times U \times \alpha$$

$$Q_{solar,op} = A \times I \times FSo/100$$

Para a infiltração de ar adotou-se, como hipótese simplificadora, 0,5 renovação de ar por hora aplicada ao volume climatizado de 390 m³. A carga foi estimada pela diferença de entalpia entre as condições externas e internas, segundo $Q_{inf} = \dot{m} \times (h_e - h_i)$. Essa parcela foi tratada para o conjunto do escritório, pois as portas das duas salas administrativas permanecem normalmente abertas e não há medição que permita repartir de forma confiável a infiltração entre as três zonas.

$$Q_{inf} = \dot{m} \times (h_e - h_i)$$

A transferência pela laje superior foi analisada separadamente, uma vez que a temperatura da residência existente sobre o escritório não foi medida. Foi aplicada a expressão $Q_{laje} = U_{laje} \times A_{laje} \times (T_{sup} - T_i)$, com análise de sensibilidade para temperaturas superiores de 24 °C, 26 °C e 28 °C. Desse modo, evita-se atribuir um único valor não observado à condição do pavimento superior.

$$Q_{laje} = U_{laje} \times A_{laje} \times (T_{sup} - T_i)$$

Tabela 2 - Parâmetros adotados na estimativa comparativa de carga térmica

Parâmetro	Valor adotado	Origem/observação
Temperatura externa de bulbo seco	34,0 °C	Londrina-PR, 0,4 %; ABNT NBR 16401-1:2024
Temperatura externa de bulbo úmido	21,7 °C	Londrina-PR, coincidente; ABNT NBR 16401-1:2024
Condição interna	24 °C; 50 % UR	Hipótese de projeto para comparação
Transmitância da parede	2,37 W/(m².K)	Componente cerâmico de referência - ProjetEEE
Transmitância do vidro	5,70 W/(m².K)	Hipótese provisória para vidro monolítico
Fator solar do vidro fumê	0,60	Hipótese provisória para vidro fumê ~6 mm
Irradiância - fachada frontal	300 W/m²	Parâmetro comparativo; não medido
Irradiância - lateral exposta	500 W/m²	Parâmetro comparativo; não medido
Ganho térmico por pessoa	117 W/pessoa	Atividade sentada/muito leve - ASHRAE 2025
Estação de trabalho	76,2 W/posto	Desktop + monitor com fatores de diversidade
Impressora	63,9 W/unidade	Pico médio × fator de diversidade
Infiltração	0,5 renovação/h	Hipótese simplificadora
Transmitância da laje	3,74 W/(m².K)	Laje maciça 10 cm de referência - ProjetEEE
Absortância - fachada atual	0,70	Cor escura de referência; Lamberts et al. (2014)
Absortância - cinza claro	0,30	Cor clara de referência; Lamberts et al. (2014)
Absortância - branco	0,20	Pintura branca de referência; Lamberts et al. (2014)
Película de controle solar	FS = 0,32	Desempenho de referência em vidro tonalizado; 3M (2026)
Toldo externo frontal	65 % de bloqueio	Hipótese comparativa baseada em U.S. DOE (2016)

Fonte: Autor do Projeto

A geometria utilizada no cálculo considerou a recepção como um retângulo de 16 m no sentido frente-fundos por 7 m na fachada principal. A lateral onde se localizam as duas salas administrativas foi tratada como parcialmente compartilhada com essas salas, e as superfícies externas remanescentes foram classificadas conforme a exposição observada. Como apenas uma dimensão das duas pequenas janelas da recepção foi medida aproximadamente, adotou-se, de forma provisória, 0,60 m × 0,60 m para cada abertura. Para permitir a comparação entre acabamentos externos, o ganho solar das paredes opacas expostas foi incorporado por meio do fator solar FSo. Esse procedimento representa uma aproximação estacionária e não reproduz integralmente a inércia térmica e a defasagem temporal da alvenaria, razão pela qual os resultados devem ser interpretados principalmente de forma comparativa entre os cenários.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cenário A - situação atual

O Cenário A representa a configuração atual do escritório, mantendo as características construtivas, ocupação, equipamentos, iluminação, superfícies envidraçadas e capacidades de climatização levantadas em campo. A estimativa foi realizada por ambiente para as cargas diretamente atribuíveis a cada zona e, em seguida, complementada pela infiltração e pela análise de sensibilidade da laje superior para obtenção da carga global do conjunto.

Cargas térmicas internas

Na recepção, os cinco ocupantes representam aproximadamente 585 W, a iluminação 162 W, os cinco postos de computador aproximadamente 381 W e as três impressoras cerca de 192 W. A soma das cargas internas resulta, portanto, em aproximadamente 1.320 W, equivalentes a 4.500 BTU/h. Em cada sala administrativa, considerando um ocupante habitual, um computador, uma impressora e uma lâmpada de 18 W, a carga interna estimada é de aproximadamente 275 W, ou 940 BTU/h. A presença de clientes não foi incorporada à ocupação habitual; cada pessoa adicional acrescentaria aproximadamente 117 W, equivalentes a cerca de 400 BTU/h, enquanto permanecesse no ambiente.

Carga pela envoltória, superfícies transparentes e absorção solar das paredes

Considerando as áreas externas modeladas, a transmissão simplificada pelas paredes resultou em aproximadamente 2.618 W para a recepção, 284 W para a sala administrativa frontal e 427 W para a sala administrativa sem janela. A transmissão pelos vidros foi estimada em 543 W na recepção e 342 W na sala frontal. Para os ganhos solares pelas superfícies transparentes, a porta e as pequenas janelas da recepção resultaram em aproximadamente 1.800 W, enquanto a janela frontal da sala administrativa acrescentou 1.080 W. Ao incorporar a absorção solar das paredes opacas com $\alpha = 0,70$ e $FS_o = 6,64 \%$, obteve-se parcela adicional de aproximadamente 1.812 W na recepção e 60 W na sala frontal. A sala sem janela permanece praticamente sem ganho solar direto pelas paredes consideradas, pois suas superfícies externas são predominantemente sombreadas.

Tabela 3 - Estimativa local de carga térmica no Cenário A

Parcela	Recepção / sala principal	Sala adm. frontal	Sala adm. sem janela
Cargas internas	1.320 W	275 W	275 W
Transmissão - paredes	2.618 W	284 W	427 W
Transmissão - vidros	543 W	342 W	0 W
Ganho solar - vidros	1.800 W	1.080 W	0 W
Ganho solar - paredes opacas	1.812 W	60 W	0 W
Subtotal local	8.093 W / 27.610 BTU/h	2.041 W / 6.960 BTU/h	702 W / 2.400 BTU/h

Fonte: Autor do projeto.

A Tabela 3 mostra que a recepção concentra a maior parte da carga local estimada, em razão da combinação entre área de envoltória, ocupação, equipamentos, superfícies envidraçadas e exposição solar da parede lateral. A inclusão do ganho solar dos elementos opacos aumenta principalmente a carga da recepção, cuja fachada lateral exposta possui grande área e acabamento escuro. As duas salas administrativas, apesar de possuírem a mesma geometria, continuam apresentando comportamento distinto pela presença da grande janela frontal em apenas uma delas.

Infiltração e carga global do conjunto

Para 0,5 renovação de ar por hora no volume total de 390 m³, obteve-se vazão aproximada de 54 L/s. Considerando as condições psicrométricas adotadas, a parcela de infiltração foi estimada em cerca de 1,02 kW, ou 3.480 BTU/h. Somada aos subtotais locais refinados, a carga global do conjunto, antes da contribuição da laje superior, alcança aproximadamente 40.450 BTU/h.

Esse valor deve ser interpretado como estimativa de bloco para comparação e não como dimensionamento executivo. A ASHRAE destaca que zonas distintas podem apresentar picos em horários diferentes e que o pico do conjunto não corresponde necessariamente à soma simples de todos os picos individuais. No presente estudo, a simplificação é aceitável como base comparativa porque os mesmos critérios serão mantidos nos Cenários B, C e D.

Comparação com a capacidade instalada

Tabela 4 - Comparação entre carga local estimada e capacidade nominal instalada

Ambiente	Carga local estimada	Capacidade instalada	Diferença nominal
Recepção / sala principal	27.610 BTU/h	18.000 BTU/h	-9.610 BTU/h
Sala administrativa frontal	6.960 BTU/h	7.000 BTU/h	+40 BTU/h
Sala administrativa sem janela	2.400 BTU/h	7.000 BTU/h	+4.600 BTU/h
Subtotal das zonas	36.970 BTU/h	32.000 BTU/h	-4.970 BTU/h

Fonte: Autor do projeto.

A comparação por zona evidencia uma distribuição desigual da capacidade instalada. Com a inclusão do ganho solar da parede lateral escura, a recepção apresenta carga local estimada cerca de 9.610 BTU/h superior aos 18.000 BTU/h instalados diretamente nesse ambiente. A sala frontal permanece praticamente coincidente com a capacidade do aparelho de 7.000 BTU/h, enquanto a sala sem janela apresenta margem nominal aproximada de 4.600 BTU/h. As portas internas normalmente abertas permitem troca térmica entre as zonas, mas essa transferência não foi quantificada separadamente.

No conjunto, os 32.000 BTU/h instalados permanecem na mesma ordem de grandeza da demanda calculada, porém a carga global preliminar de aproximadamente 40.450 BTU/h supera a capacidade nominal total em cerca de 26,4 %. Esse resultado reforça que a condição existente deve ser interpretada como referência comparativa e que o efeito real depende da simultaneidade dos picos, da operação dos equipamentos, da massa térmica da edificação e da temperatura do pavimento superior.

Influência da laje superior e análise de sensibilidade

A laje não recebe radiação solar diretamente porque existe uma residência no pavimento superior. Contudo, sua contribuição depende da temperatura desse ambiente. Como essa temperatura não foi medida, foram analisadas três condições. Quando o pavimento superior é considerado a 24 °C, não existe fluxo líquido pela aproximação adotada. A 26 °C, a laje acrescenta aproximadamente 972 W; a 28 °C, aproximadamente 1.945 W.

Tabela 5 - Sensibilidade da carga global à temperatura do pavimento superior

Temperatura superior	Carga pela laje	Carga global estimada	Diferença frente a 32.000 BTU/h
24 °C	0 W	40.450 BTU/h	+26,4 %
26 °C	972 W / 3.320 BTU/h	43.770 BTU/h	+36,8 %
28 °C	1.945 W / 6.640 BTU/h	47.090 BTU/h	+47,2 %

Fonte: Autor do projeto.

A análise de sensibilidade demonstra que a condição do pavimento superior constitui uma das principais fontes de incerteza do Cenário A. Por essa razão, o valor de 40.450 BTU/h deve ser entendido como referência do modelo sem diferença térmica através da laje. Caso o pavimento superior permaneça a 26 °C, a estimativa global sobe para aproximadamente 43.770 BTU/h; a 28 °C, alcança cerca de 47.090 BTU/h.

Discussão preliminar do Cenário A

Os resultados do Cenário A sugerem que a recepção é a zona termicamente mais crítica. Além de reunir a maior área, cinco postos de trabalho, maior quantidade de iluminação, três impressoras e a principal porta envidraçada, ela possui uma extensa parede lateral exposta ao sol da manhã e acabamento externo escuro. Em contrapartida, a sala administrativa sem janela possui 7.000 BTU/h para uma carga local calculada muito inferior. Como as portas internas normalmente permanecem abertas, parte da capacidade excedente das salas pode contribuir indiretamente para o ambiente principal por mistura de ar; contudo, essa transferência não foi quantificada.

A comparação entre as duas salas administrativas também evidencia a influência das superfícies transparentes. Mantendo-se dimensões, ocupação, iluminação, computador, impressora e capacidade de climatização praticamente iguais, a sala frontal apresentou carga local aproximadamente 2,9 vezes maior que a sala sem janela, principalmente pela janela de 6 m² exposta à fachada norte.

O Cenário A também evidencia as limitações da presente estimativa. A espessura exata e as propriedades ópticas do vidro não foram identificadas; as duas pequenas janelas da recepção foram aproximadas geometricamente; a infiltração não foi medida; a absorvância da tinta externa foi representada por uma classe de cor; e a temperatura da residência superior permanece desconhecida.

Além disso, o fator solar aplicado às paredes opacas não representa integralmente a dinâmica de armazenamento e atraso térmico da alvenaria. Por isso, os resultados devem ser utilizados principalmente para comparação entre cenários e não como substituição de um projeto executivo de climatização.

Cenário B - proteção das superfícies envidraçadas

O Cenário B avalia intervenções aplicadas à porta frontal de 8,8 m² e à janela de 6,0 m² da sala administrativa frontal, mantendo as demais características do escritório constantes. No subcenário B1 foi considerada uma película de controle solar com fator solar de 0,32, valor compatível com desempenho de referência informado para película aplicada sobre vidro monolítico tonalizado (3M, 2026). No B2 foi considerado um toldo externo retrátil ou fixo capaz de reduzir em 65 % o ganho solar direto sobre as duas grandes superfícies frontais durante a condição crítica; esse percentual foi adotado como hipótese comparativa com base em referências do U.S. Department of Energy para dispositivos de sombreamento externos. O B3 combina as duas estratégias.

Efeito da película e do toldo sobre o ganho solar

Na condição atual, as superfícies transparentes contribuem com aproximadamente 1.800 W de ganho solar na recepção e 1.080 W na sala frontal. Com a película de controle solar, essas parcelas caem para cerca de 960 W e 576 W, respectivamente. O toldo externo, aplicado apenas às superfícies frontais, reduz os ganhos para aproximadamente 770 W na recepção e 378 W na sala frontal, mantendo sem sombreamento direto as duas pequenas janelas laterais. Na combinação película + toldo, os ganhos solares transparentes diminui para aproximadamente 411 W na recepção e 202 W na sala frontal.

Tabela 6 - Efeito das estratégias de proteção solar nas superfícies envidraçadas

Cenário	Ganho solar - recepção	Ganho solar - sala frontal	Carga global	Redução vs. A
A - atual	1.800 W	1.080 W	40.450 BTU/h	-
B1 - película	960 W	576 W	35.870 BTU/h	11,3 %
B2 - toldo	770 W	378 W	34.540 BTU/h	14,6 %
B3 - película + toldo	411 W	202 W	32.720 BTU/h	19,1 %

Fonte: Autor do projeto.

Entre as alternativas isoladas, o toldo apresentou maior redução que a película porque intercepta parte da radiação antes que ela alcance o vidro. A combinação B3 apresentou o melhor desempenho do grupo, reduzindo a carga global calculada de aproximadamente 40.450 para 32.720 BTU/h, equivalente a 19,1 %. Mesmo sem modificar a fachada opaca, esse resultado aproxima a demanda calculada da capacidade nominal total instalada de 32.000 BTU/h. A eficiência real de um toldo dependerá de sua projeção, altura, largura, ângulo solar e horário de operação; portanto, o percentual adotado não representa garantia de desempenho para qualquer geometria.

Cenário C - redução da absorção solar da fachada

O Cenário C mantém os vidros na condição atual e altera apenas a absorvância das paredes expostas, simulando a repintura da fachada. A condição existente foi representada por $\alpha = 0,70$, correspondente a uma classe de acabamento escuro. No C1 foi adotado $\alpha = 0,30$, representando um acabamento claro; no C2, $\alpha = 0,20$, correspondente a pintura branca de referência. Como a transmitância e a geometria da parede permanecem inalteradas, a diferença entre os cenários decorre exclusivamente da parcela solar associada ao acabamento externo.

Tabela 7 - Influência da absorvância da fachada na carga térmica

Cenário	Absorvância α	FSo da parede	Carga global	Redução vs. A
A - cinza escuro	0,70	6,64 %	40.450 BTU/h	-
C1 - cor clara	0,30	2,84 %	36.800 BTU/h	9,0 %
C2 - branco	0,20	1,90 %	35.890 BTU/h	11,3 %

Fonte: Autor do projeto.

A repintura para uma cor clara reduziu a carga global em aproximadamente 3.650 BTU/h, enquanto a alternativa branca produziu redução de cerca de 4.560 BTU/h. O resultado demonstra que a mudança de acabamento superficial pode produzir efeito mensurável sem alterar a composição construtiva da parede. Entretanto, a escolha de uma cor real deve ser baseada, preferencialmente, na

absortância declarada ou medida do produto, pois a percepção visual de tonalidade não determina sozinha seu comportamento no espectro solar.

Fachada verde como alternativa complementar

A implantação de uma fachada verde também foi considerada conceitualmente como alternativa de sombreamento da parede. Revisões de literatura indicam que fachadas vegetadas podem reduzir a temperatura superficial externa por mecanismos de sombreamento, evapotranspiração e criação de uma camada de ar junto à parede; Bakhshoodeh, Ocampo e Oldham (2022), por exemplo, identificaram temperaturas externas de paredes com fachadas verdes aproximadamente 3,2 a 3,5 °C inferiores às de paredes sem vegetação em períodos quentes. Apesar desse potencial, a solução não foi incorporada ao cálculo principal porque seu desempenho depende de espécie vegetal, densidade foliar, distância da parede, irrigação, orientação e manutenção. Dessa forma, foi mantida como alternativa complementar para investigação futura, enquanto os cenários quantitativos priorizam intervenções com parâmetros mais facilmente reproduzíveis.

Cenário D - combinação das estratégias

O Cenário D combina a solução B3, composta por película de controle solar e toldo externo, com a redução da absortância das paredes expostas. O D1 utiliza acabamento claro com $\alpha = 0,30$, enquanto o D2 utiliza pintura branca com $\alpha = 0,20$. Como as intervenções atuam sobre parcelas distintas do balanço térmico - superfícies transparentes e paredes opacas -, seus efeitos foram somados no modelo mantendo-se constantes as cargas internas, a infiltração e a transmissão por diferença de temperatura.

Tabela 8 - Resultado dos cenários combinados

Cenário	Intervenções	Recepção	Carga global	Redução vs. A
D1	Película + toldo + cor clara	19.340 BTU/h	29.070 BTU/h	28,1 %
D2	Película + toldo + branco	18.460 BTU/h	28.150 BTU/h	30,4 %

Fonte: Autor do projeto.

O D2 apresentou o menor valor entre as alternativas simuladas, com carga global de aproximadamente 28.150 BTU/h antes da contribuição da laje superior, redução de 30,4 % em relação ao Cenário A. Na recepção, a carga local cai para cerca de 18.460 BTU/h, valor muito próximo dos 18.000 BTU/h instalados diretamente no ambiente. O D1 também apresentou redução expressiva, atingindo aproximadamente 29.070 BTU/h no conjunto.

A análise de sensibilidade da laje continua aplicável aos cenários de intervenção, pois as estratégias propostas não alteram a superfície entre o escritório e a residência superior. Se o pavimento superior estiver a 26 °C, devem ser acrescentados aproximadamente 3.320 BTU/h aos valores globais: o D1 passa para cerca de 32.390 BTU/h e o D2 para aproximadamente 31.470 BTU/h. Se a temperatura superior atingir 28 °C, o acréscimo é de aproximadamente 6.640 BTU/h, elevando D1 e D2 para cerca de 35.710 e 34.790 BTU/h, respectivamente. Assim, mesmo o melhor retrofit não elimina a influência da condição térmica do pavimento superior.

Comparação geral dos cenários

Tabela 9 - Comparação global das alternativas simuladas

Cenário	Descrição	Carga global	Redução	Relação com 32.000 BTU/h
A	Condição atual	40.450 BTU/h	-	+26,4 %
B1	Película solar	35.870 BTU/h	11,3 %	+12,1 %
B2	Toldo externo	34.540 BTU/h	14,6 %	+7,9 %
B3	Película + toldo	32.720 BTU/h	19,1 %	+2,3 %
C1	Pintura clara	36.800 BTU/h	9,0 %	+15,0 %
C2	Pintura branca	35.890 BTU/h	11,3 %	+12,2 %
D1	B3 + pintura clara	29.070 BTU/h	28,1 %	-9,2 %
D2	B3 + pintura branca	28.150 BTU/h	30,4 %	-12,0 %

Fonte: Autor do projeto.

A comparação geral indica que nenhuma intervenção isolada apresentou redução equivalente à combinação das estratégias. O sombreamento externo foi mais efetivo que a película quando analisado isoladamente, enquanto a pintura branca apresentou ganho ligeiramente superior ao acabamento claro. A maior redução ocorreu no D2, no qual a atuação simultânea sobre os grandes panos de vidro e sobre as paredes expostas reduziu a carga calculada em aproximadamente 12.300 BTU/h em relação à condição atual.

Do ponto de vista prático, o D1 merece atenção por representar uma alternativa esteticamente menos extrema que a fachada totalmente branca e ainda reduzir a carga global em mais de 28 %. O D2 apresenta o melhor resultado

térmico, mas a diferença entre D1 e D2 é de aproximadamente 920 BTU/h no conjunto. Essa diferença permite discutir que a escolha final não precisa ser determinada exclusivamente pelo menor valor de carga térmica, podendo considerar estética, manutenção, disponibilidade de materiais, custo e aceitação dos usuários.

Os resultados reforçam o caráter integrado das estratégias passivas. A proteção externa das aberturas atua antes da entrada da radiação pelo vidro, a película reduz a fração solar transmitida e o acabamento claro diminui a energia absorvida pelas paredes. Em conjunto, essas medidas reduzem a solicitação térmica antes da atuação dos condicionadores de ar, princípio coerente com a utilização da climatização artificial como complemento de uma envoltória mais eficiente.

CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar quantitativamente a influência de estratégias passivas sobre a carga térmica e o dimensionamento da climatização de uma edificação comercial existente utilizada como escritório. A partir do levantamento das características geométricas, construtivas e operacionais da edificação, foram estimadas as principais cargas internas e externas dos ambientes climatizados e comparados diferentes cenários de intervenção envolvendo proteção das superfícies envidraçadas e redução da absorção solar das fachadas.

Na condição atual, representada pelo Cenário A, a carga térmica global foi estimada em aproximadamente 40.450 BTU/h, antes da consideração de eventual diferença de temperatura através da laje superior. Esse valor mostrou-se superior à capacidade nominal total instalada de 32.000 BTU/h, correspondendo a uma diferença aproximada de 26,4%. A análise por ambiente indicou que a recepção constitui a zona mais crítica da edificação, apresentando carga local estimada de aproximadamente 27.610 BTU/h para uma capacidade instalada de 18.000 BTU/h. Em contrapartida, a sala administrativa sem janela apresentou carga significativamente menor, enquanto a sala frontal, apesar de possuir a mesma geometria e capacidade de climatização, apresentou solicitação térmica superior

devido à presença da grande superfície envidraçada voltada para a fachada principal.

Os resultados obtidos para o Cenário B demonstraram que a proteção das superfícies envidraçadas apresenta potencial relevante para redução da carga térmica. A aplicação isolada de película de controle solar reduziu a estimativa global em 11,3%, enquanto o toldo externo apresentou redução de 14,6%. A combinação dessas duas soluções, correspondente ao Cenário B3, apresentou melhor desempenho, reduzindo a carga global para aproximadamente 32.720 BTU/h, valor 19,1% inferior ao cenário atual e próximo da capacidade nominal total instalada.

A alteração do acabamento externo da fachada também apresentou resultados favoráveis. A substituição da pintura escura por uma tonalidade clara reduziu a carga estimada em aproximadamente 9,0%, enquanto a alternativa branca resultou em redução de 11,3%. Esses resultados indicam que intervenções relativamente simples, como a escolha de acabamentos de menor absorvência solar, podem contribuir para diminuir os ganhos térmicos pelas superfícies opacas sem necessidade de modificações significativas na composição da alvenaria existente.

As maiores reduções foram obtidas nos cenários que combinaram diferentes estratégias. O Cenário D1, composto por película de controle solar, toldo externo e pintura clara, apresentou carga global aproximada de 29.070 BTU/h, correspondente a uma redução de 28,1% em relação à situação atual. O Cenário D2, que substituiu o acabamento claro por pintura branca, apresentou o menor valor calculado, aproximadamente 28.150 BTU/h, representando redução de 30,4%. A diferença relativamente pequena entre D1 e D2, de aproximadamente 920 BTU/h, demonstra que a alternativa de acabamento claro também apresenta desempenho expressivo e permite que fatores como estética, manutenção, custo e aceitação dos usuários sejam considerados na escolha da solução final.

Os resultados reforçam que o desempenho térmico da edificação não depende exclusivamente da capacidade dos equipamentos de climatização. A orientação das fachadas, a presença de grandes superfícies envidraçadas, a exposição solar das paredes, a cor dos acabamentos externos, a ocupação e os equipamentos internos apresentaram influência relevante sobre a carga calculada. Nesse sentido, estratégias passivas podem atuar anteriormente ao sistema

mecânico, reduzindo os ganhos de calor que posteriormente precisam ser removidos pelos aparelhos de ar-condicionado.

A análise também evidenciou que a distribuição da capacidade instalada entre os ambientes não ocorre de maneira proporcional às cargas estimadas. Enquanto a recepção apresentou demanda local superior à capacidade dos dois equipamentos instalados diretamente nesse espaço, a sala administrativa sem janela apresentou margem nominal significativa. Como as portas internas permanecem normalmente abertas, existe possibilidade de troca térmica entre as zonas, porém essa transferência não foi quantificada no presente estudo. Dessa forma, os resultados não devem ser interpretados como diagnóstico definitivo do dimensionamento existente, mas como indicativo da influência das características arquitetônicas e construtivas sobre a solicitação térmica de cada ambiente.

Ressalta-se ainda que a pesquisa apresenta limitações decorrentes da ausência de medição direta de determinadas propriedades. A composição exata do vidro, as dimensões completas das pequenas janelas, a taxa real de infiltração, a absorvância específica da tinta existente e a temperatura da residência localizada sobre o escritório foram representadas por hipóteses de cálculo fundamentadas em valores de referência. A influência da laje superior mostrou-se particularmente relevante, uma vez que sua contribuição varia de acordo com a temperatura do pavimento superior. Por esse motivo, os valores obtidos devem ser interpretados prioritariamente de forma comparativa entre os cenários, e não como substitutos de um projeto executivo de climatização.

Conclui-se, portanto, que as estratégias passivas analisadas apresentaram potencial significativo para reduzir a carga térmica estimada da edificação comercial estudada. A atuação conjunta sobre as superfícies envidraçadas e sobre a absorção solar das fachadas mostrou-se mais eficiente do que a adoção isolada das intervenções. No caso analisado, soluções relativamente simples e compatíveis com retrofit — como película de controle solar, sombreamento externo e repintura da fachada em tonalidades de menor absorvância — foram capazes de reduzir em aproximadamente 30% a carga térmica calculada. Dessa forma, o estudo demonstra que a melhoria do desempenho da envoltória pode contribuir para adequar a solicitação térmica da edificação à capacidade de climatização disponível, reduzindo a dependência exclusiva do aumento da potência instalada e

favorecendo uma abordagem integrada entre estratégias passivas e sistemas artificiais de climatização.

REFERÊNCIAS

3M COMPANY. 3M™ Prestige 40 Window Film: Solar Control Window Film - Product Bulletin. 2026. Disponível em: <https://multimedia.3m.com/mws/media/2129875O/3m-prestige-40-solar-control-window-film.pdf>. Acesso em: 26 set. 2026.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). 2025 ASHRAE Handbook—Fundamentals. Atlanta: ASHRAE, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15220-2:2005: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15220-2:2022: Desempenho térmico de edificações — Parte 2: Componentes e elementos construtivos das edificações — Resistência e transmitância térmica — Métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD). Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16401-1:2024: Instalações de condicionamento de ar — Sistemas centrais e unitários — Parte 1: Projetos das instalações. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BAKHSHOODEH, Reza; OCAMPO, Carlos; OLDHAM, Carolyn. Thermal performance of green façades: review and analysis of published data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 155, 111744, 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111744.

BRUGNERA, Rosilene Regolão; MATEUS, Ricardo; ROSSIGNOLO, João Adriano; CHVATAL, Karin Maria Soares. Escritórios de planta livre: o impacto de diferentes soluções de fachada na eficiência energética. *Ambiente Construído*, v. 19, n. 3, p. 295-315, 2019. DOI: 10.1590/s1678-86212019000300339.

CARVALHO, M. M. Q.; LA ROVERE, E. L.; GONÇALVES, A. C. M. Analysis of variables that influence electric energy consumption in commercial buildings in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 9, p. 3199-3205, 2010.

FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. Manual de conforto térmico: arquitetura, urbanismo. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). Condicionadores de ar: Programa Brasileiro de Etiquetagem. Brasília, 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Catálogo de estações automáticas: estação Joaquim Távora (A821). Brasília: INMET, 2026. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/paginas/catalogoaut>. Acesso em: 24 set. 2026.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. Eficiência energética na arquitetura. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2014.

MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Opaque envelope parameters versus energy consumption in commercial buildings in Brazil. *Journal of Building Performance Simulation*, v. 1, n. 4, p. 237-244, 2008.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). *ProjetEEE: componentes construtivos*. Brasília, 2026. Disponível em: <https://projeteeee.mme.gov.br/componentes-construtivos/>. Acesso em: 24 set. 2026.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY (U.S. DOE). *High-Impact Technology Catalyst: Technology Deployment Strategies*. Washington, DC: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Building Technologies Office, 2016. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/08/f33/CBI%20HIT%20Deployment%20Strategy%207-27-2016.pdf>. Acesso em: 26 set. 2026.

YI, Xiaoyue; TANG, Llewellyn; YEBOAH, Siegfried. Investigations into impacts of fenestration and shading variation on ventilation and energy performance of an office in cooling and heating seasons. *Solar Energy*, v. 276, 112646, 2024. DOI: 10.1016/j.solener.2024.112646.