

CAPÍTULO 1

RITMO CIRCADIANO EM EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS: AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA LUZ NATURAL EM DIFERENTES TIPOLOGIAS



<https://doi.org/10.22533/at.ed.723122504061>

Data de aceite: 12/06/2025

Erika Ciconelli de Figueiredo

Universidade Presbiteriana Mackenzie
São Paulo, Brasil

Maria Augusta Justi Pisani

Universidade Presbiteriana Mackenzie
São Paulo, Brasil

Samuel Bertrand Melo Nazareth

Universidade de São Paulo
São Paulo, Brasil

RESUMO: Os ritmos circadianos são processos internos que refletem o ciclo solar de 24 horas e permitem que os organismos se ajustem, ao longo do tempo, às mudanças em seu ambiente. A desregulação dos ritmos circadianos, embora frequentemente associada ao *jet lag*, ao trabalho em turnos noturnos e à exposição à luz artificial durante a noite, não se limita a essas condições, refletindo um espectro mais amplo de fatores ambientais e comportamentais. Hábitos contemporâneos de vida provocam uma perturbação no ciclo natural sono-vigília, levando ao desenvolvimento de diversas doenças. A desregulação circadiana é apontada como um dos fatores que contribuem para o

desenvolvimento de doenças, juntamente com tabagismo, alimentação inadequada, fadiga, baixa qualidade do sono, aumento do índice de massa corporal e obesidade. A duração insuficiente da exposição à luz natural e o excesso de exposição à luz artificial durante a noite resultaram em uma desconexão entre os indivíduos e o ambiente, favorecendo o surgimento de questões psicológicas. O objetivo desta pesquisa é avaliar o potencial circadiano de três modelos de edifícios com base nos critérios da Certificação WELL, comparar a distribuição de luz natural entre eles e fornecer princípios de projeto para promover o ritmo circadiano e aprimorar o bem-estar dos usuários em edifícios de escritórios. A ferramenta *Adaptive Lighting for Alertness* (ALFA) foi utilizada para calcular o Lux Melanópico Equivalente (EML) segundo o critério da Certificação WELL nos cenários definidos. Os resultados sugerem que distâncias menores entre a fachada e o core do edifício podem beneficiar os usuários ao favorecer um ritmo circadiano regular, promovendo um ciclo circadiano consistente, melhorando a qualidade do sono, reduzindo os níveis de estresse e diminuindo o risco de desenvolvimento de doenças graves.

INTRODUÇÃO

Os ritmos circadianos são processos internos que refletem o ciclo solar de 24 horas e permitem que os organismos se ajustem, ao longo do tempo, às mudanças em seu ambiente. A presença dos ciclos claro-escuro (dia-noite) fornece pistas temporais para todo o organismo, por meio de comunicação tanto humorai quanto neural. Há fortes evidências que associam os ritmos circadianos à saúde mental e à regulação do humor. Transtornos de humor frequentemente coincidem com alterações em respostas reguladas pelo relógio circadiano, incluindo distúrbios nos padrões de sono e na produção de cortisol. Por outro lado, disfunções nos ritmos circadianos são comumente associadas a fatores como *jet lag*, trabalho em turnos noturnos ou exposição à luz artificial durante o período noturno (Walker *et al.*, 2020).

Usuários de escritório passam a maior parte do tempo em ambientes internos, o que resulta em uma exposição reduzida à luz natural ao longo de suas carreiras. Consequentemente, a dependência da iluminação artificial, especialmente em horários mais tardios, é acentuada. O principal fator que influencia os ritmos circadianos é a exposição à luz (Kantermann, 2013), em especial à luz natural (Figueiro; Nagare; Price, 2018). O padrão de vida moderno leva à desregulação do ritmo circadiano, resultando no desenvolvimento de diversas doenças. Foster (2020) destaca que as consequências de curto prazo da baixa exposição à luz natural incluem microssono, irritabilidade, problemas de concentração, falta de motivação e prejuízo de memória. Ele também enfatiza que algumas consequências de longo prazo são o estresse fisiológico e psicossocial, doenças cardiovasculares, aumento do uso de estimulantes e sedativos, e síndrome metabólica. Segundo Ticleanu (2020), a desregulação circadiana figura entre os fatores de risco, juntamente com o tabagismo, hábitos alimentares, fadiga, distúrbios do sono, elevação do índice de massa corporal e obesidade. Stevens e Rea (2001) e Stevens *et al.* (2013) propuseram uma relação entre exposição à luz artificial noturna, disfunções endócrinas e risco de câncer de mama.

A evolução do padrão de vida foi influenciada por recursos artificiais, avanços tecnológicos, globalização, entre outros fatores. O advento da luz elétrica trouxe inúmeras vantagens, como a possibilidade de estender a jornada de trabalho para além do pôr do sol. No final do século XX, no campo da arquitetura e do design de edifícios, muitos arquitetos passaram a negligenciar a incorporação da luz natural nos projetos, em grande parte devido à popularização da iluminação artificial — especialmente na era dos LEDs, em que o consumo energético e a geração de calor das fontes artificiais são mínimos.

Com o avanço da tecnologia, também aumentaram os níveis de estresse das pessoas. A duração insuficiente da exposição à luz natural e o excesso de exposição à luz

artificial durante a noite resultaram em uma desconexão entre os indivíduos e o ambiente, levando a questões psicológicas. Embora as causas do estresse possam ser diversas, é importante avaliar também o impacto do desempenho da luz natural nos edifícios sobre a saúde mental e a qualidade de vida de modo geral.

De acordo com Jung *et al.* (2010), a exposição à luz natural intensa — acima de 10.000 lux — pode diminuir os níveis de cortisol, hormônio do estresse, e a exposição à luz natural por pelo menos três horas ao dia pode reduzir o estresse no trabalho e a insatisfação (Alimoglu, Donmez, 2005 *apud* Ticleanu, 2020). Outro exemplo de como a luz nos afeta é a sonolência pós-prandial, isto é, a sonolência após o almoço. Kaida *et al.* (2006) demonstraram em suas pesquisas que meia hora de exposição à luz natural entre 1.000 lux e 4.000 lux foi quase tão eficaz quanto um breve cochilo na redução da sonolência pós-almoço, normalmente presente em indivíduos saudáveis.

Durante o período em que a luz natural era a principal fonte de iluminação dos ambientes internos, os edifícios de escritórios eram especificamente projetados para otimizar sua captação. A importância da luz natural é evidente na evolução dos arranha-céus em Chicago e Nova York desde o final do século XIX. A qualidade e a rentabilidade dos espaços de escritório estavam diretamente relacionadas à presença de grandes janelas e de pé-direito elevado, fatores que facilitavam a máxima penetração da luz natural. Consequentemente, a distância entre as janelas e a parede mais interna ou o corredor público — conhecida como profundidade do escritório — era definida com base no alcance da luz natural, antes do advento das lâmpadas fluorescentes na década de 1940. O edifício era projetado de dentro para fora, da menor célula (a sala individual) até a planta completa do pavimento (Willis, 1995).

O limite máximo de profundidade entre vinte e vinte e oito pés era observado quase universalmente e sofreu poucas alterações até a introdução da iluminação fluorescente. O que o setor denominava “profundidade econômica” referia-se ao fato de que espaços mais rasos e melhor iluminados geravam receitas mais elevadas do que interiores profundos e, portanto, mais escuros. (...) Uma pesquisa de valores realizada em Boston, em 1923, demonstrou que escritórios com quinze pés de profundidade eram alugados por US\$ 3,00 por pé quadrado, enquanto espaços com vinte e cinco pés eram locados por US\$ 2,60 e, com cinquenta pés, apenas US\$ 1,65. Considerando que estes últimos custavam quase o mesmo para construir e operar, mas geravam apenas cerca de metade da receita, a lógica de se produzir espaços de primeira qualidade ficava evidente (Willis, 1995, p. 26-27).

A Figura 1 apresenta um exemplo de edifício em Chicago do início do século XX, que era o tipo predominante na época: o modelo em quadrado oco (*hollow square*). Nesse caso, a planta possuía dois anéis de escritórios: um no perímetro e outro voltado para o pátio interno. Essa configuração proporcionava boa eficiência de planta e escritórios bem iluminados. Esse tipo de planta se manteve até a década de 1920.

A Figura 2 ilustra uma cena típica de dia de trabalho no edifício da *Metropolitan Life Insurance Company*, uma construção datada de 1896, localizada em Nova York. A imagem

mostra uma unidade de escritório com janelas do piso ao teto em ambos os lados, pé-direito elevado, layout compacto, distribuição eficiente de luz natural e uma luminária de mesa em cada estação de trabalho. A presença de uma luminária em cada estação aprimora a acuidade visual durante períodos de menor iluminação natural — uma abordagem tradicional que foi negligenciada durante um longo tempo, mas que atualmente é altamente valorizada, especialmente em sistemas de certificação de edifícios sustentáveis.

A integração entre a luz natural e a iluminação artificial nos postos de trabalho é um aspecto fundamental do projeto de ambientes corporativos, visando criar um espaço equilibrado e confortável que potencialize tanto o bem-estar quanto a produtividade dos ocupantes.

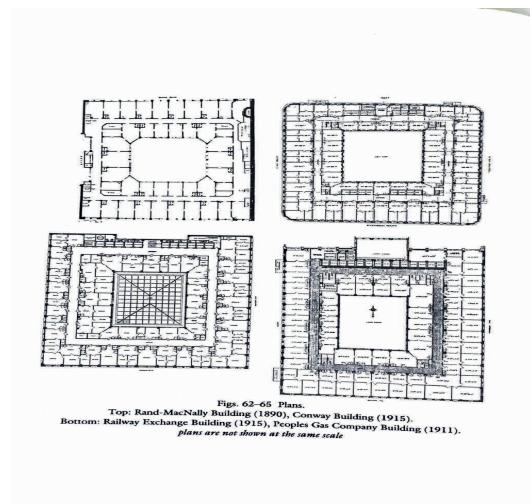


Figura 1: Edifício Conway (Willis, 1995, p. 62).



Figura 2: Funcionários trabalhando no Edifício *Metropolitan Life Insurance Company* em Nova Iorque, em 1986 (Willis, 1995, p. 30-31).

Durante o período quando a luz natural era a principal fonte de iluminação, os arquitetos testaram diferentes formas de edifícios criando pátios ou átrios internos, de modo a possibilitar o maior desempenho da luz do dia no pavimento.

A planta em “L” facilita a entrada de luz natural por duas direções, aprimorando a qualidade da iluminação. Essa tipologia é eficiente na otimização do uso da luz natural, especialmente em estruturas com área limitada de paredes externas. Elas podem melhorar a conectividade visual entre diferentes setores da edificação. As plantas do tipo “H” caracterizam-se por um átrio central ou espaço aberto, circundado por alas em ambos os lados, formando um layout que remete à letra “H”. Este design maximiza a área de perímetro exposta à luz natural, permitindo amplas oportunidades para a penetração da luz do dia na edificação. As plantas do tipo “H” são vantajosas para edifícios de escritórios maiores, que requerem grande quantidade de área de piso iluminada por luz natural. O átrio central facilita uma ampla infiltração de luz natural, minimizando a necessidade de iluminação artificial. As plantas do tipo “U” consistem em um átrio ou pátio central fechado em três lados, criando uma configuração em forma de “U”. Esse partido atinge uma combinação entre a otimização da quantidade de luz natural que entra no espaço e a garantia de certo grau de enclausuramento para a área central. As plantas tipo “O” oferecem versatilidade e são adequadas para edifícios de diferentes tamanhos e orientações. A configuração fechada em formato de “O” promove a formação de uma área protegida e reservada, ao mesmo tempo em que facilita o ingresso abundante de luz natural. Esse partido é frequentemente utilizado devido à sua versatilidade para acomodar diferentes condições de implantação.

A variedade de projetos de pátios internos demonstra a capacidade dos arquitetos de personalizar a planta do edifício de acordo com limitações específicas do terreno, objetivos de eficiência energética e distribuição da luz natural. A escolha entre os tipos “L”, “H”, “U” ou “O” depende de diversos aspectos, incluindo a disponibilidade de espaço, orientação do edifício e o conceito arquitetônico geral para a edificação de escritórios.

Com o avanço das tecnologias de engenharia civil, luminárias, lâmpadas e sistemas de ar-condicionado, tornou-se viável criar ambientes de trabalho abertos, com maiores vãos. Apesar das alegações de aumento de produtividade, os ocupantes deste tipo de escritório muitas vezes acabam trabalhando em áreas afastadas das janelas, resultando em exposição reduzida à luz natural e vistas limitadas para o exterior. Isso tem um impacto negativo sobre o ritmo circadiano dos usuários.

IpRGCs E A MELANOPSINA

De acordo com Brown (2020), a luz que atinge os olhos desencadeia respostas não visuais nos seres humanos, como a supressão da secreção de melatonina — conhecida

como hormônio do sono — e o estabelecimento do ritmo circadiano. Até o início do século XXI, acreditava-se que as únicas células fotossensíveis do olho eram os bastonetes e os cones. Contudo, uma nova classe de fotorreceptores denominada células ganglionares intrinsecamente fotossensíveis (ipRGCs) foi identificada nesse período. Acredita-se que essas células não apenas regulam o ritmo circadiano, mas também desempenham papel na visão, distinguindo padrões e monitorando os níveis gerais de luminosidade. Adicionalmente, parecem permitir que a luz ambiente influencie processos cognitivos como aprendizagem e memória. Diversas reações fisiológicas — incluindo sono, enxaquecas e transtorno afetivo sazonal (TAS) — têm sido associadas à exposição à luz. Pesquisas recentes identificaram uma correlação entre essas respostas e o funcionamento das ipRGCs (Lok, 2011).

As células ganglionares da retina são fotossensíveis devido à presença da melanopsina, uma proteína sensível à luz. As ipRGCs combinam a fototransdução intrínseca baseada em melanopsina com sinais extrínsecos mediados por bastonetes e cones. A fototransdução pode ser compreendida como o processo pelo qual a energia luminosa é convertida em sinais elétricos capazes de serem interpretados pelo organismo. Esse fenômeno ocorre principalmente no segmento externo dos cones e bastonetes da retina, tendo início com a absorção da luz pelos pigmentos visuais, o que desencadeia modificações em suas estruturas moleculares (Oyamada, 2015). Brown e Wald (*apud* Oyamada, 2015), afirmam que os bastonetes, responsáveis pela visão noturna, são sensíveis à luz por conterem rodopsina, capazes de absorver fótons em torno de 500 nm, e que os cones, responsáveis pela visão diurna, são determinados especificamente pelos tipos de opsinas presentes em suas membranas: cones sensíveis ao azul, verde e vermelho.

Respostas não visuais podem ser geradas por qualquer combinação de cinco opsinas, um grupo de proteínas sensíveis à luz: melanopsina, rodopsina, opsinas dos cones de onda longa (vermelho), onda curta (azul) e onda média (verde) (Brown, 2020). Segundo o pesquisador, as ipRGCs são essenciais no processo de fototransdução circadiana, embora não sejam os únicos fotorreceptores envolvidos.

Zaidi *et al.* (2007) demonstraram que as ipRGCs são funcionais mesmo na ausência de cones e bastonetes. A pesquisa avaliou indivíduos cegos e constatou que as respostas circadiana, neuroendócrina e neurocomportamental à luz, e até mesmo a consciência visual da luz, são mantidas em indivíduos visualmente cegos, sem uma retina externa funcional, confirmando a descoberta de um novo sistema fotorreceptor no olho de mamíferos. Esses achados questionam a visão tradicional de que a fotorrecepção mediada por bastonetes e cones é responsável por todas as respostas visuais à luz (como constrição pupilar e consciência visual), sugerindo que essas respostas, bem como as respostas circadianas e neuroendócrinas não visuais à luz, são conduzidas primariamente por um sistema fotorreceptor sensível ao azul, localizado na camada de células ganglionares.

Muitas funções do corpo humano são cíclicas. O ritmo circadiano controla não apenas as fases de sono e vigília, mas também a frequência cardíaca, pressão arterial, temperatura corporal, desempenho, humor e a produção de hormônios como melatonina e cortisol. A maior correlação bioquímica dos ciclos claro-escuro é proporcionada pelo ritmo da melatonina pineal. Em condições normais, a melatonina é produzida exclusivamente à noite, servindo como uma representação interna do fotoperíodo ambiental e indicando especificamente a duração da noite. O estímulo luminoso é captado pelos fotorreceptores presentes na retina e transmitido diretamente ao núcleo supraquiasmático (NSQ) via trato retino-hipotalâmico. A síntese e o período de produção da melatonina dependem de um sinal do NSQ para a glândula pineal, onde ocorre sua produção. O ritmo da melatonina é considerado um marcador do ritmo circadiano (Lockley; Arendt; Skene, 2007).

O ritmo circadiano oscila em uma média de 24,2 horas na ausência de indicadores externos de tempo. Os padrões diários de claro-escuro (dia e noite) incidentes sobre a retina ajustam o relógio biológico, sincronizando seu tempo ao ciclo local de 24 horas de luz e escuridão. Distúrbios nesse ritmo podem levar a doenças como má qualidade do sono e redução do desempenho, além de aumentar o risco de enfermidades mais graves, como obesidade e diabetes, entre outras. Pesquisas publicadas sobre os efeitos não visuais da luz e do ritmo circadiano, comparando iluminação artificial e natural desde a década de 1990, indicam que a iluminação exerce efeito estimulante nas pessoas, sendo a luz natural a mais eficaz (Figueiro; Nagare; Price, 2018).

Segundo Foster (2020), se um indivíduo não recebe luz suficiente e seu ritmo circadiano não está alinhado aos padrões claro-escuro, ocorrem atrasos no relógio biológico, podendo resultar em distúrbios do sono e do ritmo circadiano. O impacto desse desalinhamento é que haverá consequências tanto a curto quanto a longo prazo, e, se o indivíduo for suscetível a doenças mentais, esses sintomas podem se agravar. O autor destaca que as consequências de curto prazo são: microssono, irritabilidade, problemas de concentração, falta de motivação, prejuízo de memória, entre outros. Algumas consequências de longo prazo são estresse fisiológico e psicossocial, doenças cardiovasculares, aumento do uso de estimulantes e sedativos e síndrome metabólica.

Aoki *et al.* (1998) buscaram identificar a intensidade mínima de luz capaz de suprimir os níveis noturnos de melatonina medidos na saliva humana. Um grupo de cinco voluntários do sexo masculino e saudáveis foi exposto a diferentes intensidades de luz (<10, 500, 1.000, 2.500 e 5.000 lux). A luz utilizada no experimento era de uma lâmpada fluorescente com tonalidade branca fria. A designação “branca fria” na classificação da Osram indica temperatura de cor de 4000K. Verificou-se que a inibição da melatonina dependeu tanto da intensidade quanto da duração da exposição à luz. Os menores valores de intensidade luminosa necessários para suprimir a melatonina noturna foram de 393, 366, 339 e 285 lux para exposições de 30, 60, 90 e 120 minutos, respectivamente. Esses resultados indicam

que baixos níveis de intensidade luminosa já são suficientes para inibir a produção de melatonina em humanos.

Em dois estudos de laboratório realizados por Rea e Figueiró (*apud* Figueiro; Nagare; Price, 2018), 28 indivíduos receberam (por meio de óculos de LED) luz branca quente (temperatura de cor 2760K) durante uma hora. No primeiro estudo, os participantes foram expostos a iluminâncias de 8, 22 e 60 lux diretamente sobre a córnea. No segundo estudo, os participantes foram submetidos a iluminâncias de 60, 200 e 720 lux, também diretamente na córnea. Os pesquisadores coletaram amostras de melatonina plasmática antes e imediatamente após uma hora de exposição à luz. A análise preliminar não revelou supressão significativa de melatonina sob nenhuma condição de iluminação. Entretanto, a análise subsequente evidenciou supressão considerável da melatonina após exposição às condições de 200 e 720 lux, em comparação ao controle de baixa iluminação. Utilizando procedimento análogo, um terceiro experimento foi conduzido com fonte de luz branca fria, temperatura de cor 6400K. Nesses testes, os participantes foram expostos a iluminâncias de 115, 300 e 720 lux diretamente sobre a córnea, por uma hora. Os resultados sugerem que níveis mais elevados de iluminância de luz quente (60, 200 e 720 lux) são necessários, em comparação à luz fria (6400K), para induzir a redução nos níveis de melatonina (cerca de 15 a 20%) (Figueiro; Nagare; Price, 2018). Ou seja, embora as ipRGCs sejam mais sensíveis à luz azul (450 a 480nm), fontes luminosas com temperatura de cor de 2700K e iluminâncias de 200 lux podem inibir a produção de melatonina.

De acordo com Andersen, Mardaljevic e Lockley (2012), diversos efeitos não visuais foram identificados conforme a subdivisão do dia. Das 6h às 10h, iluminâncias naturais suficientes podem adiantar a fase do relógio biológico na maioria das pessoas (*reset circadiano*); das 10h às 18h, altos níveis de iluminância natural podem aumentar a sensação subjetiva de alerta, sem provocar grandes alterações de fase no relógio (efeito de alerta da luz natural); das 18h às 6h, a exposição à luz que possa desencadear efeitos não visuais deve ser evitada, a fim de não prejudicar o ciclo natural sono-vigília (evitar luz intensa à noite). Adiantar a fase do relógio biológico corresponde a antecipar o início dos ritmos fisiológicos diários, fazendo com que eventos como o sono e a vigília ocorram mais cedo em relação ao ciclo anterior. Esse fenômeno pode ser induzido, por exemplo, pela exposição à luz natural nas primeiras horas da manhã.

Considerando que grande parte dos edifícios de escritórios modernos não foi projetada para otimizar a penetração da luz natural nem para alinhar os ambientes ao ritmo circadiano, observa-se frequentemente uma insuficiência de luz natural nos locais de trabalho. Fatores como tonalidade do vidro, dimensões reduzidas dos vãos, uso excessivo de persianas e a distância das estações de trabalho em relação às fachadas contribuem para esse cenário. Como consequência, os funcionários tendem a apresentar sonolência, fadiga e redução no desempenho ao longo do expediente.

Além disso, jornadas prolongadas e a exposição à iluminação artificial durante a noite — especialmente com níveis de iluminância elevados (500 lux) e luz de espectro frio (em torno de 4000K) — favorecem a supressão da melatonina, agravando ainda mais o desequilíbrio fisiológico. Soma-se a esse quadro o fato de que a maioria das pessoas dificilmente têm acesso adequado à luz natural nos edifícios e raramente realiza atividades ao ar livre durante o dia, o que aumenta a propensão à desregulação circadiana.

Como a variação e a riqueza da luz natural são responsáveis pelo sincronismo do ritmo circadiano (Duffy; Wright, 2005), essas pessoas tendem a apresentar má qualidade de sono e altos níveis de estresse, impactando sua saúde e desempenho no trabalho. Segundo Walker *et al.* (2020), já é amplamente reconhecido que a exposição à luz durante a noite pode prejudicar ritmos biológicos e comportamentais, gerando consequências negativas para a saúde.

UMA MÉTRICA PARA QUANTIFICAR OS EFEITOS BIOLÓGICOS DA LUZ.

Um grupo de pesquisadores propôs, em 2013, um sistema que pondera a irradiação de acordo com a sensibilidade espectral efetiva *in vivo* das cinco proteínas opsinas retinianas humanas conhecidas (melanopsina, rodopsina e opsinas dos cones S, M e L). Essa foi uma resposta inicial à ausência de uma métrica adequada para quantificar as respostas oculares à luz dependentes das ipRGCs. Este arcabouço foi posteriormente formalizado como um padrão internacional, que inclui um sistema de metrologia compatível com o SI (Sistema Internacional) para respostas à luz influenciadas por ipRGCs (*Commission Internationale de l'Eclairage – CIE S026*) (Brown *et al.*, 2022).

Lucas, Peirson, Berson, Brown, Cooper, Czeisler, Figueiro, Gamlin, Lockley, O'Hagan, Price, Provencio, Skene and Brainard propuseram o modelo de Lux Melanópico Equivalente (EML), enquanto o *Lighting Research Center* estabeleceu o modelo Circadian Stimulus (CS). A Comissão Internacional de Iluminação (CIE) também sugeriu uma métrica baseada no mesmo paradigma biológico do EML, porém com uma escala diferente (Schlangen; Price, 2021). Matematicamente, uma unidade de EML equivale a 0,91 unidades de *Melanopic Daylight Equivalent D65*. Tanto o modelo CS quanto o EML são fundamentados na distribuição espectral de potência, e não apenas na intensidade visual. É fundamental observar que ambos os modelos consideram a luz que incide nos olhos no plano vertical. Isso representa uma mudança em relação à abordagem tradicional de iluminação, que prioriza a iluminação da área de tarefa ou do objeto a ser observado, no plano horizontal (Soler, 2019).

Essas métricas proporcionaram parâmetros para avaliar o estímulo circadiano de um ambiente. São eles: a razão M/P e o EML. A razão M/P (*melanopic/ photopic*), de acordo com Miller e Irvin (2019), é uma nova métrica espectral utilizada para avaliar as consequências da luz sobre a saúde, o bem-estar e os estados de alerta, relaxamento

ou sono. A visão fotópica é a designação dada à sensibilidade ocular sob condições de intensidade luminosa que permitem a distinção de cores (Foster, 2020). A iluminância melanópica define a magnitude das respostas circadianas humanas à luz, fornecendo o melhor preditor disponível para as respostas do sistema circadiano humano (Brown, 2020). Essa relação M/P compara o potencial melanópico (relacionado às ipRGCs) com a capacidade da fonte de luz de produzir luz adequada para a visão de detalhes durante o dia (fotópica) (Miller; Irvin, 2019). Pesquisas mostram que quanto mais energia é emitida na faixa espectral à qual as ipRGCs são mais sensíveis (460 nm a 480 nm), maior o potencial de alerta da fonte luminosa (Ticleanu; 2020); por outro lado, quanto menor a razão M/P, melhores as condições para sono e relaxamento.

Para diferentes distribuições espectrais de potência de fontes de luz, a função de eficiência espectral melanópica pode ser utilizada para determinar a iluminância melanópica (dada em unidades de EML). Ela indica a absorção de luz por meio da melanopsina, a proteína fotossensível presente nos receptores ipRGCs. A Certificação WELL propõe limiares para analisar um ambiente e verificar se o desempenho é aceitável para conformidade com os requisitos. Os resultados horários de EML no período das 7h às 10h são avaliados para determinar todos os vetores que atingem o estímulo mínimo exigido (250 EML) nas três horas de análise. Esses vetores são então definidos como *Circadian-Effective* (CE) para aquele dia (Konis, 2017). Os vetores consideram a posição da cabeça e a direção do olhar.

A Certificação WELL determina que a conformidade seja demonstrada em pelo menos 75% das estações de trabalho. Além disso, deve haver um mínimo de 200 EML, medido no plano vertical voltado para frente, a uma altura de 1,2 metros (4 pés) acima do piso acabado, simulando o campo de visão do ocupante. Esse nível de iluminação pode englobar a luz natural e deve estar disponível de forma consistente das 9h às 13h ao longo de todo o ano.

O requisito mínimo para envidraçamento do envelope do edifício é de 15% ou 25% da área total dos ambientes ocupados regularmente. As janelas devem apresentar transmitância de luz visível (T_{vis}) superior a 40%.

É importante ressaltar que T_{vis} superior à 40% é raríssimo nos edifícios de escritórios de São Paulo devido à condição climática da cidade, onde os dias quentes predominam. A necessidade de reduzir o consumo de ar-condicionado — principal responsável pelo gasto energético em edifícios de escritórios — também dificulta o cumprimento dos parâmetros estabelecidos pela Certificação WELL.

MÉTODO

A eficácia do EML foi avaliada em duas tipologias distintas de edifícios. Foram calculados 3 cenários:

1) um edifício (45 m x 45 m) com núcleo central (15 m x 15 m) e sem sombreamento na fachada;

2) um edifício (41 m x 25 m) com núcleo lateral (21 m x 9 m) na fachada oeste, sem sombreamentos externos;

3) um edifício (41 m x 25 m) com núcleo lateral (21 m x 9 m) na fachada oeste e fachada reprojetada, fazendo uso de dispositivos de proteção solar e vidros com dois Tvis distintos, de acordo com os parâmetros encontrados por Figueiredo (2016).

A Tabela 1 apresenta os parâmetros dos modelos. Os materiais empregados consistem em paredes e teto pintados de branco nos ambientes e piso de cor escura.

As análises foram realizadas nos equinócios e solstícios, às 9h e ao meio-dia (faixa horária indicada pela Certificação WELL), em São Paulo (latitude 23°30').

O vidro considerado para os modelos de São Paulo foi um vidro duplo IGU verde, com Tvis de 32%, selecionado da biblioteca do ALFA (*Adaptive Lighting for Alertness*), o programa utilizado na simulação. O ALFA, que opera em conjunto com o software Rhinoceros, é uma ferramenta que permite prever e controlar os efeitos não visuais da luz no projeto arquitetônico.

O ALFA realiza apenas cálculos estáticos, não baseados em clima, e apresenta algumas limitações quanto à variedade de materiais e tipos de céus. Neste experimento, foram considerados dois tipos de céus: claro e encoberto. Os resultados das simulações são apresentados em EML. A escala da simulação está indicada na Figura 5.

A posição do núcleo de circulação vertical (ou *core*) para esta avaliação foi estabelecida de acordo com a pesquisa conduzida por Pisani e Figueiredo (2011). Com base no levantamento de dados de edifícios em São Paulo, Brasil, de 1979 a 2010, os principais tipos de edifícios de escritórios contemporâneos podem ser categorizados em duas tipologias: core centralizado no pavimento ou em uma das laterais do edifício.

Edifícios com core central correspondem a 21% dos edifícios analisados. A segunda tipologia, caracterizada por um núcleo posicionado junto a uma das laterais do edifício, pode ser subdividida em duas subcategorias: edifícios com o núcleo localizado dentro da geometria do edifício (43,5% dos edifícios analisados) e edifícios com núcleo externo à geometria do edifício (21% dos edifícios analisados). A zona do núcleo, que inclui escadas, elevadores e sanitários, foi desconsiderada na malha analítica. Os modelos foram avaliados considerando apenas a luz natural como fonte de iluminação.

O *design* de fachada proposto no cenário 3 (Figura 4) foi desenvolvido a partir do conceito de divisão funcional da fachada apresentado por Hausladen *et al.* (2004), em que os autores definem a função de cada parte da fachada. Segundo eles, cada área tem um propósito específico, seja para distribuição da luz natural, para vistas externas,

ventilação ou controle térmico. O cenário 3 incorpora dois tipos de vidro com diferentes Tvis e uma prateleira de luz (*light shelf*), visando melhorar o desempenho do pavimento tanto em relação à luz natural quanto ao potencial circadiano.

Parâmetro	Valores
Altura do teto	2,80 m
Tamanho da janela (com caixilho)	1,80 m
Altura do peitoril	1,00 m
Céu	Encoberto e claro
Edifícios ao redor	Não
Espaçamento da malha	1,00 m
Número de vetores de vista por ponto da malha	8
Malha horizontal (altura dos olhos)	1,20 m
Espectro do solo / Albedo	Uniforme 0,15

Tabela 1: Parâmetros do modelo.

A Figura 3 apresenta os cenários 1 e 2 sem sombreamento externo, enquanto a Figura 4 indica um corte do modelo da fachada proposta (cenário 3). A prateleira de luz (*light shelf*) foi utilizada para aumentar o alcance da luz natural na direção do interior do edifício. O vidro posicionado acima da prateleira de luz apresenta uma transmitância luminosa (Tvis) elevada, de 88%, a fim de potencializar a quantidade de luz natural que adentra o ambiente e aumentar as interreflexões internas. O vidro localizado abaixo da prateleira de luz, na porção da fachada com proteções solares, possui um Tvis de 53%. As proteções solares foram aplicadas para bloquear a incidência direta da luz solar, prevenindo assim o ofuscamento.

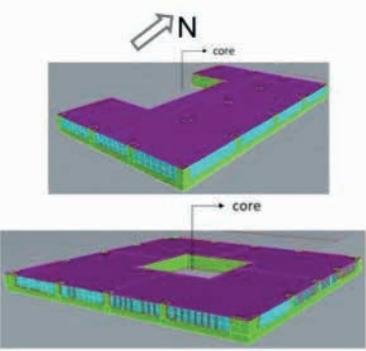


Figura 3: Lateral and central core model without external shadings.

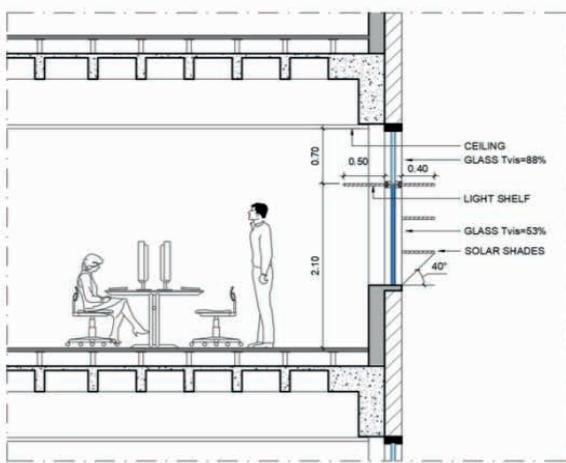


Figura 4: Proposta de design para a fachada(Figueiredo, 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tipologias de edifícios retangular e quadrada atendem aos requisitos da Certificação WELL em todos os cenários (céu encoberto e céu claro) ao longo de todo o ano. A Figura 5 apresenta os resultados de EML para ambas as tipologias, às 9h e ao meio-dia, durante os equinócios e solstícios, considerando o plano vertical voltado para a área envidraçada de maior dimensão.

No modelo retangular (cenário 2), a área de maior potencial circadiano se estende até 9 metros a partir da fachada leste. Essa área é a mais indicada para a disposição das estações de trabalho, principalmente perpendicularmente às fachadas. As áreas com menor potencial circadiano podem ser utilizadas para ambientes de permanência curta, como circulação, arquivos, equipamentos, sanitários e depósitos.

Na tipologia quadrada (cenário 1), a área de maior potencial circadiano se estende até 15 metros a partir da fachada leste. Como o edifício é simétrico, essa distância se

repete na fachada oposta durante o período da tarde. O vidro selecionado para o modelo, comumente utilizado em edifícios de São Paulo, não atende ao requisito de Tvis estabelecido pela Certificação WELL.

Embora os resultados pareçam aceitáveis nos dois cenários, as altas iluminâncias e a probabilidade de ofuscamento no interior do edifício (próximo às fachadas), torna necessário o fechamento das persianas internas, privando os usuários dos benefícios da luz natural e das vistas para o exterior.

A Figura 6 apresenta, de forma ampliada e comparativa, os resultados de desempenho dos cenários 2 e 3. O cenário 3 demonstra uma redução de 16.800 lux na iluminância junto às aberturas, o que representa uma diminuição de 76% em relação ao cenário 2. Essa queda pode indicar uma menor probabilidade de ofuscamento¹. Observa-se também que, próximo ao núcleo de circulação vertical (a 16 metros da fachada), a redução da iluminância em relação ao cenário 2 foi de apenas 149 lux no cenário 3, sendo que a queda de iluminância é mais abrupta no cenário 2 quando comparado ao cenário 3.

A iluminância controlada apresentada no cenário 3, proporcionada pelas proteções solares externas e pelo vidro de controle solar, permite a manutenção das vistas externas e uma iluminação com uma variação menor. Outra vantagem do cenário 3 é que, caso necessário, pode-se instalar persianas abaixo da prateleira de luz para mitigar possíveis desconfortos visuais ou questões de privacidade, permitindo ainda a entrada de luz natural pela porção acima da prateleira de luz.

A comparação dos cálculos indica que a combinação dos vidros com diferentes Tvis, a proteção solar externa e a prateleira de luz melhoram o desempenho tanto em relação à distribuição da luz natural quanto no potencial circadiano, se considerada a posição da cadeira da estação de trabalho perpendicular à fachada de maior dimensão.

Ambos os vidros selecionados para o modelo atenderiam ao requisito de Tvis estabelecido pela Certificação WELL. Os critérios de EML também seriam atendidos - estímulo mínimo exigido de 250 EML.

1. Nabil e Mardaljevic(2005) determinaram o limiar para a probabilidade de ofuscamento em 3.000 lux.

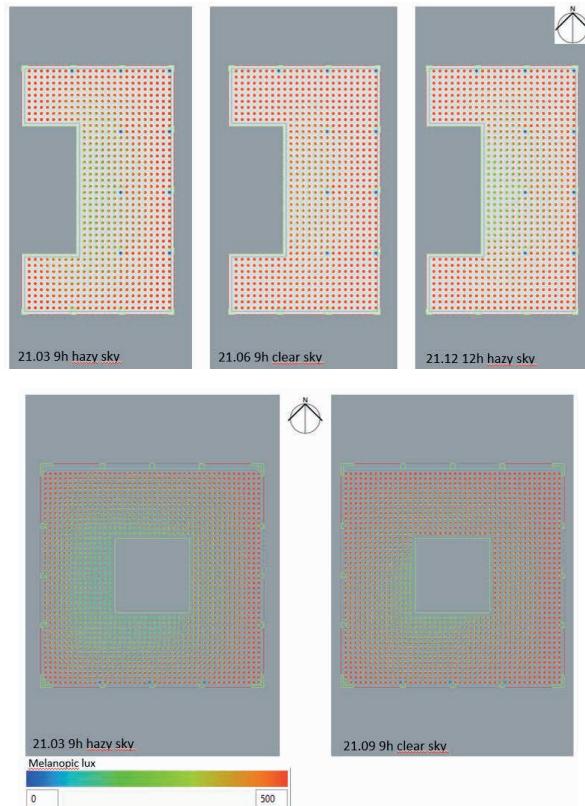


Figura 5: Performance do modelo.

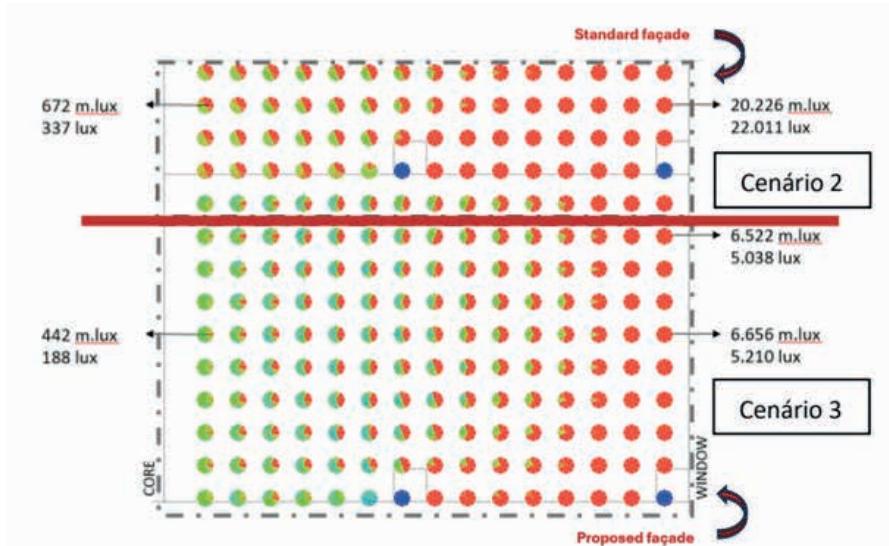


Figura 6: Performance do modelo de São Paulo com o design proposto para a fachada selecionada.4

CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo reforçam a importância de priorizar soluções arquitetônicas que valorizem o uso da luz natural como estratégia fundamental para promover a saúde circadiana e o bem-estar dos ocupantes de edifícios de escritórios. Por meio de simulações com diferentes tipologias e propostas de fachada, evidenciou-se que pavimentos com profundidade menor, fachadas otimizadas e elementos como prateleiras de luz podem ampliar significativamente as áreas com potencial circadiano adequado ao atendimento dos critérios da Certificação WELL, mesmo sob condições de céu encoberto e claro.

A análise dos modelos demonstrou que a distribuição eficiente da luz natural, além de reduzir a dependência da iluminação artificial durante o dia, pode contribuir para a regulação dos ritmos biológicos dos ocupantes, melhorando a qualidade do sono, reduzindo os níveis de estresse e prevenindo doenças associadas à desregulação circadiana. Soluções como a redução da profundidade dos ambientes, o correto dimensionamento dos vãos envidraçados, a adoção de proteções solares externas e o uso de vidros de transmitâncias distintas se mostraram eficazes para equilibrar o aproveitamento da luz natural, o controle do ofuscamento e a manutenção das vistas externas.

Além disso, o estudo ressalta que parte significativa dos edifícios corporativos em São Paulo não foi projetada considerando o alinhamento entre arquitetura e saúde, sendo necessário incentivar políticas públicas, normas técnicas e ações de conscientização junto ao setor de projeto e construção civil. Ao evidenciar que medidas relativamente simples podem ter impactos relevantes sobre o conforto, produtividade e bem-estar, este trabalho contribui para aproximar as recomendações internacionais às práticas e desafios locais.

Portanto, recomenda-se que arquitetos, engenheiros, gestores e tomadores de decisão considerem, já nas etapas iniciais de concepção de edifícios de escritórios, estratégias de maximização da luz natural e de estímulo ao ritmo circadiano, adaptadas à realidade climática, cultural e econômica brasileira. Dessa forma, será possível não apenas atender aos requisitos de certificações internacionais de bem-estar, mas também criar ambientes corporativos mais saudáveis, sustentáveis e resilientes às futuras demandas de saúde coletiva.

5 LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS PARA PESQUISAS FUTURAS

Apesar dos avanços apresentados neste estudo, algumas limitações devem ser reconhecidas. Primeiramente, as simulações foram realizadas com base em cenários estáticos e horários específicos (9h e 12h), o que não contempla toda a variabilidade sazonal e climática observada ao longo do ano em São Paulo. A ferramenta utilizada (ALFA) não realiza simulações dinâmicas baseadas em dados climáticos horários, o que pode limitar a precisão dos resultados em relação ao comportamento real da luz natural no ambiente construído.

Além disso, o modelo adotado não considerou a influência de mobiliário, divisórias internas, uso efetivo de persianas ao longo do expediente, variação de ocupação dos ambientes e possíveis alterações no *layout* dos escritórios. Tais fatores podem impactar significativamente a distribuição da luz natural e, consequentemente, a efetividade do estímulo circadiano.

Outro ponto relevante refere-se à representatividade dos materiais de fachada e dos parâmetros ópticos adotados, que podem variar consideravelmente no mercado nacional em função de disponibilidade, custos e práticas construtivas regionais. Recomenda-se, portanto, que estudos futuros considerem a diversidade de soluções de fachadas presentes em diferentes regiões do Brasil, incluindo cidades de outras zonas bioclimáticas.

Apesar do alinhamento com métricas internacionais, como o EML e a Certificação WELL, o contexto brasileiro ainda apresenta desafios adicionais, como a baixa difusão de certificações de saúde e bem-estar em edifícios comerciais, restrições orçamentárias e barreiras culturais para a adoção de novas tecnologias construtivas.

Perspectivas para pesquisas futuras incluem a realização de simulações dinâmicas anuais com dados climáticos horários (baseados em TMY ou dados meteorológicos locais), bem como estudos de pós-ocupação que avaliem a percepção dos usuários quanto ao conforto luminoso, à produtividade e ao bem-estar. Além disso, seria relevante analisar estratégias passivas adaptadas à realidade brasileira, como o uso de brises, prateleiras de luz e materiais de alto desempenho, em conjunto com soluções de baixo custo para maximizar a entrada de luz natural e minimizar o ofuscamento.

A expansão para diferentes tipologias de edifícios e cidades brasileiras com distintas realidades climáticas e urbanas, assim como a inclusão de aspectos comportamentais e culturais dos ocupantes, pode contribuir para um maior aprofundamento e aplicabilidade dos resultados.

REFERÊNCIAS

BROWN, Timothy M. Melanopic illuminance defines the magnitude of human circadian light responses under a wide range of conditions. *Journal Of Pineal Research*, [S.L.], v. 69, n. 1, p. 1-14, 19 abr. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/jpi.12655>.

BROWN, Timothy M.; BRAINARD, George C.; CAJOCHECHEN, Christian; CZEISLER, Charles A.; HANIFIN, John P.; LOCKLEY, Steven W.; LUCAS, Robert J.; MÜNCH, Mirjam; O'HAGAN, John B.; PEIRSON, Stuart N.. Recommendations for daytime, evening, and nighttime indoor light exposure to best support physiology, sleep, and wakefulness in healthy adults. *Plos Biology*, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 1-15, 17 mar. 2022. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pbio.3001571>.

DUFFY, Jeanne F.; WRIGHT, Kenneth P.. Entrainment of the Human Circadian System by Light. *Journal Of Biological Rhythms*, [S.L.], v. 20, n. 4, p. 326-338, ago. 2005. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0748730405277983>.

FIGUEIREDO, Erika Ciconelli de. Peles de vidro: otimização do desempenho da luz natural difusa em fachadas envidraçadas. 2016. 192 f. Tese (Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo.

FIGUEIRO, Mg; NAGARE, R; PRICE, Lla. Non-visual effects of light: how to use light to promote circadian entrainment and elicit alertness. **Lighting Research & Technology**, [S.L.], v. 50, n. 1, p. 38-62, 25 jul. 2017. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1477153517721598>.

FOSTER, Russel. **How Light Exposure Affects Human Health**. Londres: SII Lighting Research & Technology Symposium 1 CIBSE, 2020.

HAUSLADEN, Gerhard; SALDANHA, Michael de; LIEDL, Petra; SAGER, Christina. **ClimateDesign: solutions for buildings that can do more with less technology**. Basel: Birkhäuser Architecture, 2005.

JUNG, Christopher M.; KHALSA, Sat Bir S.; SCHEER, Frank A. J. L.; CAJOCHEM, Christian; LOCKLEY, Steven W.; CZEISLER, Charles A.; WRIGHT, Kenneth P.. Acute Effects of Bright Light Exposure on Cortisol Levels. **Journal Of Biological Rhythms**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 208-216, 19 maio 2010. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0748730410368413>.

KAIDA, Kosuke; TAKAHASHI, Masaya; HARATANI, Takashi; OTSUKA, Yasumasa; FUKASAWA, Kenji; NAKATA, Akinori. Indoor Exposure to Natural Bright Light Prevents Afternoon Sleepiness. **Sleep**, [S.L.], v. 29, n. 4, p. 462-469, 1 abr. 2006. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/sleep/29.4.462>.

KANTERMANN, Thomas. Circadian Biology: sleep-styles shaped by light-styles. **Current Biology**, [S.L.], v. 23, n. 16, p. 689-690, 19 ago. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2013.06.065>.

KONIS, Kyle. A novel circadian daylight metric for building design and evaluation. **Building And Environment**, [S.L.], v. 113, p. 22-38, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.025>.

LOCKLEY, Steven W.; ARENDT, Josephine; SKENE, Debra J.. Visual impairment and circadian rhythm disorders. **Dialogues In Clinical Neuroscience**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 301-314, 30 set. 2007. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.31887/dcns.2007.9.3/slockley>.

LOK, Corie. Vision science: seeing without seeing. **Nature**, [S.L.], v. 469, n. 7330, p. 284-285, jan. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/469284a>.

LUCAS, Robert J.; PEIRSON, Stuart N.; BERSON, David M.; BROWN, Timothy M.; COOPER, Howard M.; CZEISLER, Charles A.; FIGUEIRO, Mariana G.; GAMLIN, Paul D.; LOCKLEY, Steven W.; O'HAGAN, John B.. Measuring and using light in the melanopsin age. **Trends In Neurosciences**, [S.L.], v. 37, n. 1, p. 1-9, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tins.2013.10.004>.

MILLER, Naomi; IRVIN, Anne. M/P Ratios: a call for consistency times change and so must calculations. **LD+A: Illuminating Engineering Society**, Nova Iorque, v. 1, n. 1, p. 12-14, fev. 2020.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. **Lighting Research & Technology**, [S.L.], v. 37, n. 1, p. 41-57, mar. 2005. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1191/1365782805li128oa>.

OYAMADA, Maria Kiyoko. Fototransdução:: ativação, inativação e adaptação. **Rbm Revista Brasileira de Medicina**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 68-72, 20 nov. 2015.

PISANI, Maria Augusta Justi; FIGUEIREDO, Erika Ciconelli de. Difícios de escritórios em São Paulo: tipologias de 1979 a 2010. In: LARES - LATIN AMERICAN REAL ESTATE SOCIETY, 11., 2011, São Paulo. **Anais 11ª Conferência Internacional da LARES - Latin American Real Estate Society**. São Paulo: Lares, 2011. p. 1-12.

SCHLANGEN, Luc J. M.; PRICE, Luke L. A.. The Lighting Environment, Its Metrology, and Non-visual Responses. **Frontiers In Neurology**, [S.L.], v. 12, p. 1-14, 4 mar. 2021. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fneur.2021.624861>.

SOLER, Robert. **Circadian rhythms**: a call to arms to create spaces with brighter days and darker nights. A call to arms to create spaces with brighter days and darker nights. Disponível em: <https://resources.wellcertified.com/articles/circadian-rhythms/>. Acesso em: 26 nov. 2024.

STEVENS, Richard G.; BRAINARD, George C.; BLASK, David E.; LOCKLEY, Steven W.; MOTTA, Mario E.. Breast cancer and circadian disruption from electric lighting in the modern world. **Ca: A Cancer Journal for Clinicians**, [S.L.], v. 64, n. 3, p. 207-218, 24 dez. 2013. Wiley. <http://dx.doi.org/10.3322/caac.21218>.

STEVENS, Richard G.; REA, Mark S.. Light in the built environment: potential role of circadian disruption in endocrine disruption and breast cancer. **Cancer Causes And Control**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 279-287, 2001. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1011237000609>.

TICLEANU, Cosmin. **Research Insight 01: Circadian lighting**. Londres: CIBSE, 2020.

WALKER, William H.; WALTON, James C.; DEVRIES, A. Courtney; NELSON, Randy J.. Circadian rhythm disruption and mental health. **Translational Psychiatry**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 1-13, 23 jan. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41398-020-0694-0>.

WILLIS, Carol. **Form follows finance**. New York: Princeton Press, 1995.

ZAIDI, Farhan H.; HULL, Joseph T.; PEIRSON, Stuart N.; WULFF, Katharina; AESCHBACH, Daniel; GOOLEY, Joshua J.; BRAINARD, George C.; GREGORY-EVANS, Kevin; RIZZO, Joseph F.; CZEISLER, Charles A.. Short-Wavelength Light Sensitivity of Circadian, Pupillary, and Visual Awareness in Humans Lacking an Outer Retina. **Current Biology**, [S.L.], v. 17, n. 24, p. 2122-2128, dez. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2007.11.034>.