ABORDAGEM DO RITMO CIRCADIANO NO PROJETO DE ILUMINAÇÃO NATURAL EM EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS

Erika Ciconelli De Figueiredo (1)
(1) PhD, Arquiteta e Professora da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, erika.figueiredo@mackenzie.br, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Rua Itambé, 185, São Paulo, SP, (11) 3230 6390

RESUMO
A relevância da luz natural extrapolou as questões de economia de energia ou iluminâncias requisitadas pelas normas, após o descobrimento da terceira classe de fotorreceptores: as células ganglionares intrinsecamente fotossensíveis (ipRGCs). Essas células são responsáveis pelas respostas não-visuais, reguladoras do ritmo circadiano, culminando, consequentemente, no desempenho fisiológico e comportamental dos indivíduos. Esta pesquisa se propôs a analisar um exemplar da tipologia recorrente de edifícios de escritórios em São Paulo, sob o ponto de vista do desempenho do ritmo circadiano dos usuários, com o objetivo de traçar diretrizes projetuais que visassem o aproveitamento da iluminação natural e o bem-estar dos seus ocupantes. O método empregou a ferramenta ALFA (*Adaptive Lighting for Alertness*) na tipologia selecionada, de modo a avaliar seu potencial em relação ao ritmo circadiano dos usuários. Os resultados indicaram a necessidade de avaliação da pertinência dos edifícios peles de vidro para a cidade de São Paulo, cujo parâmetro *window-to-wall ratio* excede o recomendado por pesquisadores da área, assim como estudos das fachadas a partir da geometria da insolação, como a análise do fator de visão de céu e proteções solares, além da escolha dos vidros seletivos. Para que os usuários dos edifícios de escritório possam se beneficiar da iluminação natural, e a estratégia se torne um recurso viável, é indispensável que os arquitetos projetem as envoltórias e os espaços internos, de acordo com o alcance da luz natural em quantidades que favoreçam o bem-estar, a produtividade e o comprometimento dos seus ocupantes, e evitem a ocorrência de ofuscamento.

Palavras-chave: ritmo circadiano, iluminação natural, ALFA.

ABSTRACT
The relevance of natural light has extrapolated the energy saving or illuminance issues required by the standards, after the discovery of the third class of photoreceptors: intrinsically photosensitive retinal ganglion cells (ipRGCs). These cells are responsible for non-visual responses, which regulate circadian rhythm, consequently culminating in the physiological and behavioral performance of individuals. This research aimed to analyze an example of the recurrent typology of office buildings in São Paulo, from the point of view of user's circadian rhythm performance, intending to draw design guidelines to improve the well-being of its occupants and the use of daylight. The method used the ALFA tool (Adaptive Lighting for Alertness) in the selected typology to evaluate its potential in relation to the users' circadian rhythm. The results indicated the need to assess the relevance of glass-skinned facades for the city of São Paulo, whose window-to-wall ratio parameter exceeds that recommended by researchers in the field, as well as studies of solar geometry, such as sky view factor and solar shades, besides the selection of solar control glasses. To bring daylight benefits to office buildings users, and to make the strategy becomes a viable resource, it is essential that architects design envelopes and internal spaces, according to the reach of daylight in quantities that favor the well-being, productivity, and commitment of its occupants, and avoid the occurrence of glare.

Keywords: circadian rhythm, daylight, ALFA

1. INTRODUÇÃO

A relevância da aplicação da iluminação natural no projeto de arquitetura tem se tornado proeminente à medida que o número de pesquisas sobre ritmo circadiano aumenta, assim como a compreensão de que a luz natural não possui a função apenas de iluminar. Ambientes projetados para um uso efetivo da luz natural podem propiciar profundos impactos na saúde e no bem-estar dos usuários, conforme seus ritmos circadianos se tornam regulares.

No entanto, a realidade da maior parte dos edifícios peles de vidro não condiz com a justificativa dos arquitetos para o uso deste tipo de fachada: acesso visual para o exterior e iluminação natural. Segundo Mardaljevic, Heschong e Lee (2009), o cenário mais comum em edifícios com peles de vidro é o de persianas abaixadas e luzes acesas, sendo que, por uma questão de comodismo, estas persianas podem ficar abaixadas por dias, meses ou até mesmo anos (REA, 1984). A ocorrência deste cenário se dá em razão do desconforto visual resultante das altas iluminâncias próximo às aberturas, mesmo em edifícios com vidros de controle solar.

De acordo com Brown (2020), a luz que atinge os olhos conduz respostas não-visuais em humanos, como a supressão da secreção de melatonina, conhecida como o hormônio do sono, e o estabelecimento do ritmo circadiano. Até o fim do século XX acreditava-se que apenas os cones e bastonetes eram as células fotossensíveis do olho, no entanto, no início do século XXI descobriu-se uma terceira classe de fotorreceptores: as células ganglionares intrinsecamente fotossensíveis[1] (ipRGCs). Estima-se que essas células, além de serem responsáveis por sincronizar o ritmo circadiano, podem também ter um papel na visão – distinção de padrões e rastreamento dos níveis gerais de brilho - e parecem permitir que a luz ambiente influencie os processos cognitivos, como aprendizagem e memória. Muitas respostas fisiológicas foram associadas à luz, como sono, enxaqueca e transtorno afetivo sazonal[2] (SAD), e estas foram recentemente associadas à atividade das ipRGCs (LOK, 2011). A figura 1 indica uma ampliação da retina e dos fotorreceptores.

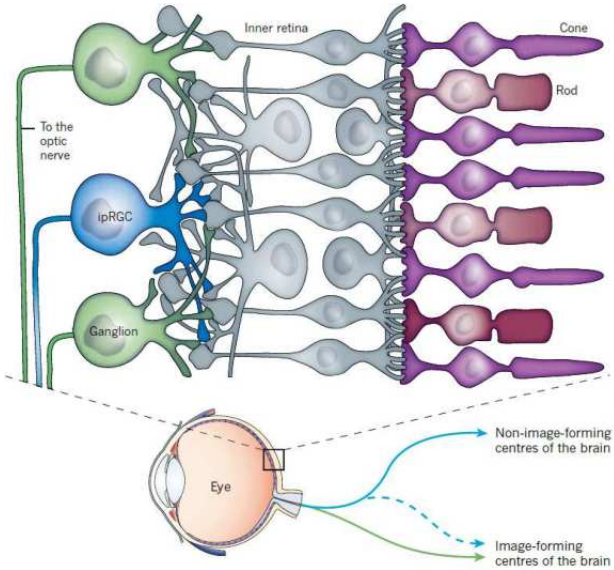

Figura 1 Ampliação da retina e indicação dos fotorreceptores.
Fonte: LOK, 2011, p. 285.

As células ganglionares são fotossensíveis devido à presença de melanopsina, uma proteína fotossensível. As ipRGCs combinam fototransdução intrínseca, baseada em melanopsina, com sinais extrínsecos mediados por cones e bastonetes. A fototransdução "é a transformação de energia luminosa em sinais elétricos biologicamente reconhecíveis, que se processa no segmento externo dos cones e bastonetes. O evento inicial é constituído pela absorção de luz pelos pigmentos visuais e pelas alterações de conformações moleculares resultantes" (OYAMADA, 2015, p. 68). Brown e Wald (1964) apud Oyamada (2015) afirmam que os bastonetes, responsáveis pela visão noturna, são sensíveis à luz, pois contêm a rodopsina, que é capaz de absorver fótons de cerca de 500 nm, e os cones, responsáveis pela visão diurna, que são determinados especificamente pelos tipos de opsina presentes em sua membrana: cones sensíveis para o azul (460 nm), para o verde (530 nm) e para o vermelho (655 nm). A figura 2, a seguir, indica o espectro visível da luz e os respectivos comprimentos de onda.

As respostas não-visuais podem ser originadas por meio de uma combinação de qualquer uma das cinco opsinas, que é um grupo de proteínas sensíveis à luz: melanopsina, rodopsina, opsinas de cone sensível a comprimento de ondas longo (ou vermelho), comprimento de ondas curto (ou azul), comprimento de ondas médio (ou verde) (BROWN, 2020). De acordo com o pesquisador, as ipRGCs são primordiais no processo de fototransdução circadiana, no entanto, estas células não são os únicos fotorreceptores envolvidos.

[1] *Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells*

[2] *Seasonal Affective Disorder*

Contudo, Zaidi *et al*. (2007) demonstraram que as ipRGCs são funcionais na ausência dos cones e bastonetes. A pesquisa avaliou indivíduos cegos e constatou que as respostas circadianas, neuroendócrinas e neurocomportamentais à luz, e mesmo a consciência visual da luz, são retidas em indivíduos visualmente cegos, sem retina externa funcional, confirmando a descoberta de um novo sistema fotorreceptor no olho dos mamíferos. Essas descobertas questionam a visão tradicional de que a fotorrecepção baseada em cones e bastonetes medeia todas as respostas visuais à luz (como constrição pupilar e consciência visual) e sugerem que essas e as respostas circadianas e neuroendócrinas não-visuais à luz são impulsionadas principalmente por um sistema fotorreceptor não-bastonete, não-cone, sensível ao comprimento de onda curto localizado na camada de células ganglionares.

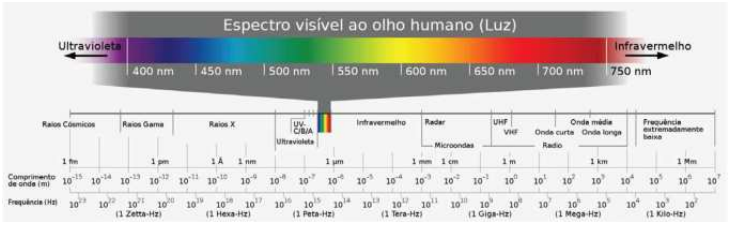

Figura 2 Espectro visível da Luz. Fonte: FRANK, 2005, s/p.

Muitas funções do corpo humano são cíclicas. O ritmo circadiano controla não somente as fases de sono e despertar, como também o batimento cardíaco, a pressão arterial, a temperatura corporal, o desempenho, o humor e a produção de hormônios, como a melatonina e o cortisol, conhecido como o hormônio do estresse.

A maior correlação bioquímica dos ciclos claro-escuro é fornecida pelo ritmo da melatonina pineal. Sob condições normais, a melatonina é produzida somente à noite, e propicia a representação interna do fotoperíodo ambiental, especificamente a duração da noite. O estímulo luminoso é levado dos fotorreceptores, presentes na retina, e transportado diretamente para o núcleo supraquiasmático (NSQ), via trato retino-hipotalâmico. A síntese e o período de produção da melatonina requerem um sinal do NSQ para a glândula pineal, onde acontece a produção de melatonina. O ritmo da melatonina é um marcador do ritmo circadiano (LOCKLEY; ARENDT; SKENE, 2007).

O ritmo circadiano oscila em uma média de 24.2 horas na ausência de indicadores exteriores de tempo. Os padrões diários de claro-escuro (dia e noite) incidentes na retina configuram o relógio biológico, ajustando o seu *timing* para corresponder com o padrão de 24h de claro-escuro local. Perturbações neste ritmo podem gerar doenças, como sono e desempenho ruins, assim como aumentar o risco de doenças mais sérias, como obesidade, diabetes, entre outras. Pesquisas publicadas sobre os efeitos não-visuais da luz e ritmo circadiano, que comparam iluminação artificial e natural desde a década de 1990, indicam que a iluminação tem um efeito estimulante sobre as pessoas, sendo que a luz natural é a mais efetiva (FIGUEIRO; NAGARE; PRICE, 2018)

De acordo com Foster (2020), se um indivíduo não receber luz suficiente e se seu ritmo circadiano não estiver alinhado com os padrões de claro-escuro, há atrasos no relógio biológico, e este indivíduo pode sofrer de *Sleep and Circadian Rhythm Disruption*[3]*,* o que resulta em consequências a curto e longo prazo, e, caso o indivíduo possua uma vulnerabilidade para doenças mentais, estes sintomas podem ser exacerbados. Foster (2020) pontua que as consequências a curto prazo são: microssono, irritabilidade, problemas de concentração, falta de motivação, comprometimento da memória, entre outros. Algumas consequências a longo prazo são: estresse fisiológico e psicossocial, doenças cardiovasculares, aumento do uso de estimulantes e sedativos e síndrome metabólica.

Aoki *et al.* (1998) procuraram identificar a intensidade mínima de luz capaz de suprimir os níveis de melatonina noturna medidos na saliva humana. Cinco voluntários saudáveis do sexo masculino foram expostos à luz em diferentes intensidades (<10, 500, 1000, 2500 e 5000lux). A luz utilizada no experimento foi uma lâmpada fluorescente *cool white*. De acordo com a nomenclatura das lâmpadas do fabricante Osram, esta nomenclatura (*cool white*) indica uma tonalidade de 4000K. Identificou-se que a supressão da melatonina era dependente da intensidade da luz e da duração da exposição à luz. As intensidades mínimas dos níveis de melatonina noturna supressora de luz foram calculadas como 393, 366, 339 e 285lux para durações de exposição de 30, 60, 90 e 120 minutos, respectivamente. Esses resultados sugerem que menos intensidade de luz é suficiente para suprimir a melatonina em humanos.

Em dois estudos de laboratório, conduzidos por Rea e Figueiró (2013 apud FIGUEIRO; NAGARO; PRICE, 2018), 28 indivíduos receberam (por meio de óculos de luz de LED) luz branca quente (temperatura de cor 2760 K) por uma hora. O primeiro estudo expôs os indivíduos a iluminâncias diretamente na córnea de 8, 22 e 60lux, e o segundo estudo expôs os indivíduos a iluminâncias diretamente na córnea de 60, 200 e

[3] Perturbações do Sono e Ritmo Circadiano.

720lux. Os autores coletaram amostras de melatonina plasmática antes e imediatamente após a exposição à luz de duração de uma hora. Enquanto os resultados do primeiro estudo não mostraram supressão de melatonina significativa de qualquer uma das condições de iluminação, os resultados do segundo estudo mostraram supressão de melatonina pós-exposição significativa das condições de 200 e 720lux em comparação com a iluminação dimerizada. Usando um protocolo semelhante, um terceiro estudo foi realizado utilizando uma fonte de luz branca fria (temperatura de cor 6400 K). Nesses estudos os indivíduos foram expostos a uma hora de iluminâncias de 115, 300 e 720lux diretamente na córnea. O resultado da pesquisa indicou que é necessária uma iluminância maior da luz quente (de 60, 200 e 720lux), comparada com a luz fria (6400K), para gerar uma redução da quantidade de melatonina próxima (entre 15 e 20% aproximadamente) (FIGUEIRO; NAGARE; PRICE, 2018). Em suma, embora as ipRGCs tenham o pico da curva de sensibilidade no espectro azul (450 a 480nm), fontes de luz quente (2700K), com iluminâncias a partir de 200 lux, podem gerar a supressão da melatonina.

De acordo com Foster (2020) a quantidade de luz que as ipRGCs necessitam (para um ritmo circadiano saudável) não é uma resposta simples e direta. Os fatores críticos para a regulação das células ganglionares intrinsicamente fotossensíveis mediar as respostas luminosas dependem da intensidade, duração do estímulo luminoso, cor da luz (comprimento de onda), período do dia (que o indivíduo teve acesso à luz) e idade (pessoas mais jovens demonstram ter maior sensibilidade à regulação do relógio biológico devido a exposição à luz). O autor ressalta que, apesar da maioria das publicações sobre a sensibilidade das ipRGCs afirmarem sua sensibilidade a um comprimento de onda de 480nm, há pesquisas que mostram a supressão de melatonina durante a exposição a comprimentos de ondas de 420nm em primatas. Foster afirma que até o momento não está claro a interação dos cones, bastonetes e ipRGCs.

Figueiro *et al*. (2017) demonstraram que a hora do dia que um indivíduo recebe luz natural afeta o seu ritmo circadiano. Os autores afirmam que ficar exposto à luz durante o período certo, favorece um ritmo circadiano regular e apontam que indivíduos com maior exposição à luz natural (das 8h às 12h), dormem melhor à noite, reportam menos depressão e menos interrupção durante o sono.

Segundo Andersen, Mardaljevic e Lockley (2012) a luz natural geralmente fornece iluminâncias significativamente mais altas do que os valores de projeto, necessários de acordo com a atividade visual dos ambientes. No entanto, a ocorrência de altas iluminâncias acontecem somente próximo às aberturas. Se as iluminâncias típicas nessas zonas são altas, mas não geram ofuscamento ou o uso de persianas, os usuários que ocupam regularmente esses espaços bem iluminados podem talvez experimentar ritmos circadianos regulares comparativamente àqueles usuários posicionados longe de janelas, que estão habitualmente expostos a níveis mais baixos de iluminação no nível dos olhos.

Estas pesquisas culminaram na demanda de indicadores do desempenho dos ambientes e, consequentemente, dos usuários. Recentemente surgiram novas métricas para cálculo de luz natural, baseados no clima, trazendo diretrizes promissoras para projeto (ANDERSEN; MARDALJEVIC; LOCKLEY, 2012). A compreensão dos efeitos da luz natural e artificial no bem-estar indicam novos caminhos para o projeto de edifícios.

2. OBJETIVO

O objetivo da pesquisa é analisar a tipologia mais recorrente em edifícios de escritórios em São Paulo, segundo o ritmo circadiano dos ocupantes, considerando dois cenários distintos: apenas iluminação natural e apenas iluminação artificial, com a meta de traçar diretrizes projetuais que visem o bem-estar, a saúde e a produtividade dos usuários.

3. MÉTODO

O método foi dividido em três etapas principais:

1. Seleção da tipologia recorrente de edifícios de escritório em São Paulo.
2. Modelagem do pavimento tipo do edifício selecionado e inserção dos parâmetros da ferramenta ALFA.
3. Simulação do desempenho circadiano do pavimento tipo do edifício WTorre – Edifício 2 na ferramenta ALFA.

3.1. Seleção da tipologia recorrente de edifícios de escritório em São Paulo.

Em tempos normais, isto é, na ausência de uma pandemia, parte da população ativa trabalha, no mínimo, 8 horas por dia em edifícios de escritórios. Isso demonstra a necessidade de pesquisas no campo da iluminação demonstrando como os efeitos visuais e não-visuais da luz podem contribuir para melhorar a qualidade de vida dos usuários dos edifícios, assim como favorecer o seu desempenho e comprometimento.

As condições de iluminação nos ambientes de trabalho contribuem para uma variedade de fatores, como humor, engajamento e satisfação no trabalho, absenteísmo, produtividade e bem-estar (BORISUIT *et al.*, 2015). Diversos estudos comprovam a preferência das pessoas por luz natural no ambiente de trabalho em relação à iluminação artificial. Borisuit *et al*. (2015) desenvolveram uma pesquisa analisando o desempenho de um grupo de voluntários em um escritório (sala teste) de 7m x 5m exclusivamente sob luz natural e exclusivamente sob luz artificial. Os participantes relataram que o estado de alerta e o bem-estar diminuíram ao longo do período vespertino em ambos os tipos de iluminação, no entanto, sob a condição exclusivamente de iluminação artificial o bem-estar físico piorou e a sonolência ocorreu mais cedo, comparativamente ao cenário apenas com iluminação natural.

A sonolência após o almoço é comum devido ao processo de digestão. O nome científico para esse processo é alcalose pós-prandial e uma das hipóteses é de que o fluxo sanguíneo do cérebro diminui para que o sistema digestivo funcione com maior eficiência (VEJA, 2019). Kaida *et al*. (2006) demonstraram em sua pesquisa que a exposição de meia hora a uma luz do dia entre 1000lux e 4000lux foi quase tão eficaz quanto um cochilo curto na redução da sonolência pós-almoço, normal em indivíduos saudáveis.

Essas pesquisas demonstraram a necessidade de se compreender as tipologias de escritórios para possibilitar o delineamento de diretrizes projetuais que melhorem o desempenho dos usuários dos edifícios em relação, ao seu bem-estar e regulação do ritmo circadiano.

Pisani e Figueiredo (2011) fizeram um levantamento e uma classificação das tipologias recorrentes de edifícios de escritórios, segundo a posição do núcleo de circulação vertical (*core*) da edificação. As pesquisadoras classificaram os tipos conforme indica a figura 3 a seguir.

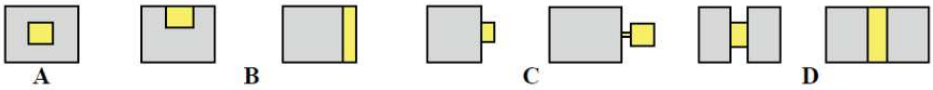

Figura 3 Classificação das tipologias recorrentes em edifícios de escritórios. Fonte: PISANI; FIGUEIREDO, 2011, p. 4

De acordo com a pesquisa, de 115 edifícios da produção paulistana publicados na Revista Projeto Design de 1979 a 2010, a tipologia "B" é a mais recorrente, com 50 edifícios. Nesta tipologia o núcleo de circulação vertical encontra-se em uma das fachadas da edificação.

O edifício WTorre Nações Unidas (WTNU), concluído em 2008 e projetado pelo arquiteto Edo Rocha, foi selecionado para a pesquisa, pois, além de atender ao requisito da tipologia, ele teve o *layout* do andar tipo divulgado, o que aproximou o estudo da realidade do uso de um edifício de escritórios. A figura 4 indica a planta divulgada na publicação da Revista Projeto Design e uma imagem da edificação.

A planta foi redesenhada no programa AutoCAD, de acordo com WTNU (2012) e a modelagem do pavimento foi desenvolvida no *software* SketchUp, onde todo o mobiliário foi inserido. Apenas as divisórias piso-teto, representadas na cor azul, foram consideradas como sendo de vidro transparente (Tvis 88%). As divisórias entre as estações de trabalho foram consideradas com 0.45m de altura acima da mesa. Somente as estações de trabalho das áreas *open space* foram analisadas nesta pesquisa. Foram consideradas as seguintes dimensões para a modelagem: pé-direito 2,80m, peitoril 0,80m e pele de vidro 2,00m. A altura do peitoril foi encontrada na planta disponibilizada por WTNU (2012) e o pé direito foi considerado o recorrente de um edifício triple A, que pode variar entre 2,70m e 2,80m.



Figura 4 Planta do andar tipo da Torre 2 do Edifício WTorre Nações Unidas. Fonte: CORBIOLI, 2009, p. 63 e 59.

3.2. Modelagem do pavimento tipo do edifício selecionado e inserção dos parâmetros da ferramenta ALFA

O modelo do pavimento tipo desenvolvido no *software* SketchUp foi importado para o programa Rhinoceros 3D e aplicado o *plugin* ALFA (*Adaptive Lighting for Alertness*), recém-lançado pela empresa Solemma, ligada ao Massachusetts Institute of Technology, MIT. A ferramenta permite a previsão e o controle dos efeitos não-visuais da luz no projeto de arquitetura, a fim de criar ambientes mais seguros, saudáveis e

produtivos (SOLEMMA, 2021). Ela consegue estimar a quantidade de luz natural e/ou artificial absorvida pelos fotorreceptores não-visuais dos ocupantes da edificação, dado sua localização e a direção da visão (iluminação no plano vertical, na altura dos olhos dos usuários, isto é, a 1,20m do piso). Os resultados das simulações são apresentados de duas formas: estado de alerta (razão M/P) e *Equivalent Melanopic Lux* (EML), que indica a absorção da luz por meio da melanopsina, a proteína fotossensível presente nos receptores ipRGCs. Além da simulação no plano vertical, o *software* desenvolve simulações no plano horizontal (a 0,76m do piso), para que seja possível entender o contexto da simulação.

A biblioteca de materiais disponível no programa possui algumas limitações, porém traz a relação M/P dos materiais opacos e vítreos, indicando que os materiais também devem ser observados nos estudos relativos ao ritmo circadiano, além da luz. A figura 6 demonstra parte da biblioteca de materiais.

A razão M/P (melanópicas/fotópicas), segundo Miller e Irvin (2019), é uma nova métrica espectral que passou a ser utilizada para avaliar as consequências da luz relacionadas à saúde, bem-estar e estados de alerta, relaxamento ou sono. Visão fotópica é a designação dada à sensibilidade do olho em condições de intensidade luminosa que permitam a distinção das cores, sendo que iluminância fotópica é a emissão da luz pela sua superfície, de acordo com Foster (2020). Essa relação compara o potencial melanópico (referente aos ipRGCs) com a capacidade da fonte de luz de produzir luz apropriada para a visão de detalhes no período diurno (fotópica) (MILLER; IRVIN (2019). Pesquisas evidenciam que quanto mais energia é emitida na faixa espectral à qual as ipRGCs são mais sensíveis (460nm a 480nm), maior é o potencial de alerta da fonte de luz (TICLEANU; LITTLEFAIR, 2020); por outro lado, quanto mais baixa a relação M/P, melhor são as condições para o sono e relaxamento.

Esta pesquisa utilizou apenas os resultados do estado de alerta (razão M/P) para a avaliação do pavimento tipo do edifício selecionado. A ferramenta ALFA considera que o estado de alerta ocorre quando a razão M/P é maior que 0.9 (cor azul) e que o estado de relaxamento (cor laranja) acontece quando M/P for menor que 0.35. O resultado entre 0.35 e 0.9 (cor cinza) foi chamado nesta pesquisa de estado neutro, pois o espectro e a quantidade da luz não afetam o ritmo circadiano. A direção da visão é representada, por padrão, em 8 posições distintas e indicadas por meio de um círculo subdividido. A quantidade de avaliações, em relação à direção da visão, pode ser alterada, de acordo com a necessidade de cada estudo. A figura 7 indica parte da modelagem do pavimento tipo e a legenda dos resultados, de acordo com a avaliação da razão M/P. O programa avalia o espectro da cor da luz, em relação à resposta ao estímulo luminoso.

Para as simulações com iluminação artificial foram utilizadas luminárias de 0.60m x 0.60m, 48W de potência do sistema, fluxo luminoso (sistema) 5400lm, eficiência de 112.5lm/W, com refletor e aletas parabólicas, LED integrado com temperatura de cor de 4000 K, a mesma temperatura de cor utilizada na maior parte dos edifícios de escritórios. As luminárias foram distribuídas pelo pavimento de acordo com parâmetros de luminotécnica. Esta temperatura de cor da luz (4000K) é mais estimulante para o ritmo circadiano, devido ao seu pico no comprimento de onda por volta de 450nm. A figura 5 traz uma comparação entre os espectros de quatro fontes luminosas: luz do céu claro (temperatura de cor 7506K, sem a luz do sol); luz solar direta (temperatura de cor 5503K); luz artificial branca neutra (temperatura de cor 4186K) e luz artificial branca quente (2167K).

É necessário inserir o acabamento de todos os materiais no modelo, durante a sua configuração, para desenvolver a simulação utilizando a ferramenta ALFA. Sendo assim, foram utilizados os acabamentos no pavimento tipo de acordo com a foto divulgada do interior do edifício: teto, paredes, pilares na cor branca e piso cinza escuro. A luminária utilizada na simulação seguiu o mesmo padrão da luminária divulgada na publicação da Revista Projeto. O mobiliário, assim como os seus acabamentos, foi escolhido pela autora da pesquisa, sendo: mesas de madeira clara, cadeiras na cor preta; divisórias entre as mesas (sobre as estações de trabalho) na cor branca; vidro transparente nas divisórias piso-teto (Tvis 88%) e vidro da envoltória Tvis 26%. A transmissão luminosa exata do vidro do WTNU não foi encontrada em nenhuma publicação. Supôs-se que esse valor variasse entre 20 e 30%, que é uma média utilizada nos edifícios de escritórios construídos recentemente na cidade de São Paulo.

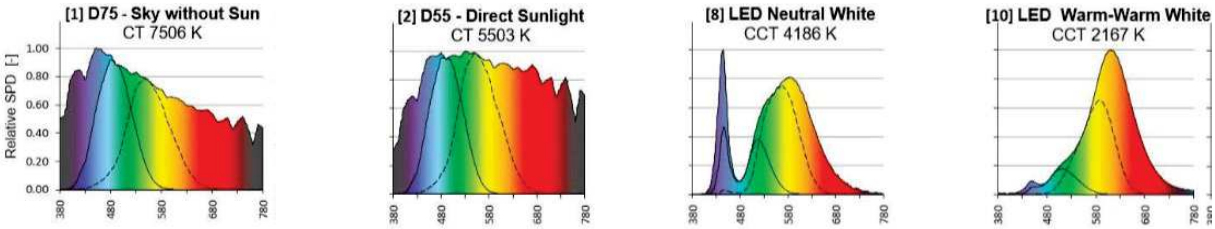

Figura 5 Espectro da luz em diferentes fontes luminosas. Fonte: MAIEROVA, 2018, p. 3.

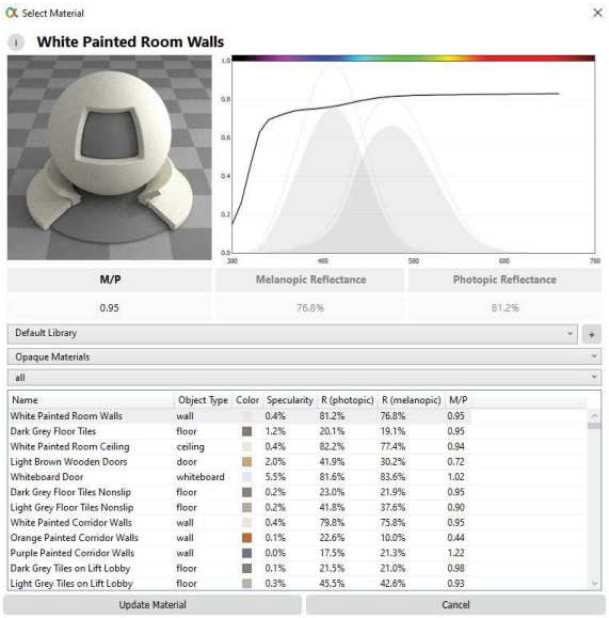

Figura 6 Biblioteca de materiais da ferramenta ALFA.

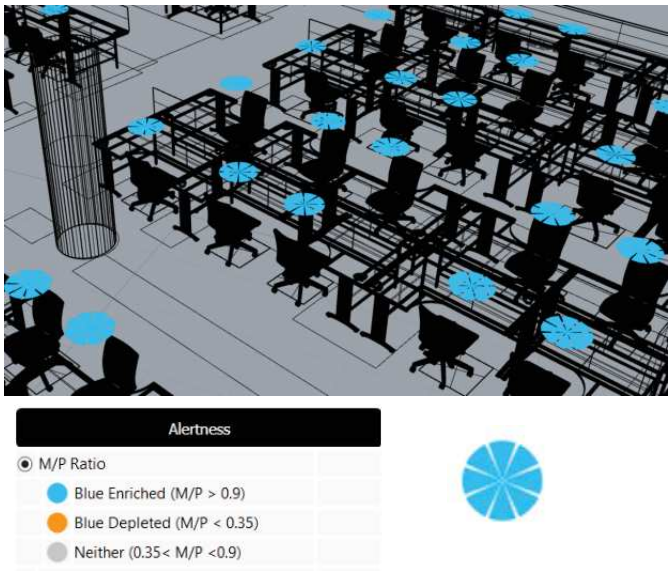

Figura 7 Modelagem do pavimento e legenda dos resultados.

3.3 Simulação do desempenho circadiano do pavimento tipo do edifício WTorre – Edifício 2 na ferramenta ALFA.

É necessário especificar um dia e horário para todas as simulações na ferramenta ALFA, obrigatoriamente. Sendo assim, as simulações foram desenvolvidas para às 9h da manhã do dia 21/03, com céu claro com sol em dois cenários distintos: somente iluminação artificial e somente iluminação natural. No caso da simulação apenas com iluminação artificial, trocou-se o vidro por parede na cor clara, para que fosse possível fazer uma comparação entre uma situação em que não houvesse iluminação natural, como um cenário recorrente em edifícios de escritórios, onde as persianas podem passar longos períodos abaixadas.

A figura 8 indica o resultado do cenário apenas com iluminação artificial, onde 58,2% das posições avaliadas encontram-se dentro do parâmetro *blue enriched* ou estado de alerta e 41,8% dentro do intervalo neutro, onde não há estímulo para o ritmo circadiano. A iluminância média no plano de trabalho (fotópica) resultou em uma média de 785lux, em que 100% dos sensores registraram iluminâncias acima de 300 lux; em relação ao conforto visual, a iluminância fotópica média foi de 610lux. Observa-se que o pico do espectro da luz na simulação encontra-se por volta de 450nm.

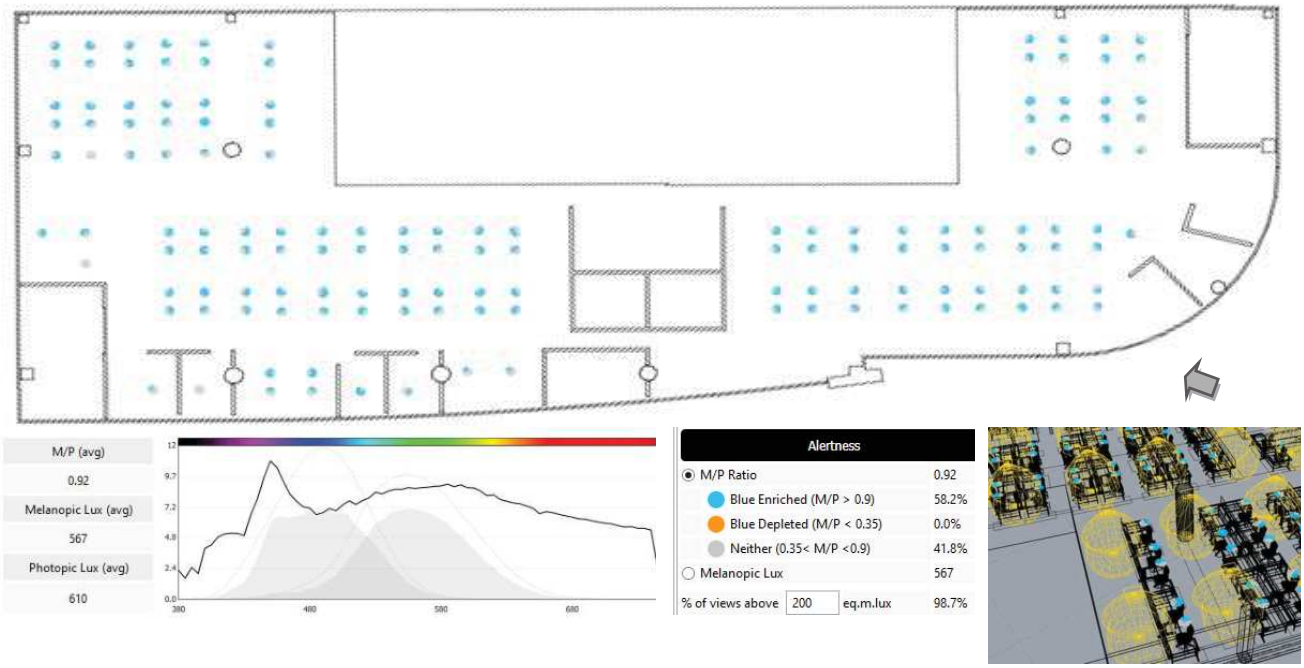

Figura 5 Resultado da simulação apenas com iluminação artificial.

A figura 9 apresenta os resultados da simulação apenas com iluminação natural, onde 100% das direções da visão dos usuários nas estações de trabalhos avaliadas ficaram acima do parâmetro *blue enriched* ou estado de alerta. A iluminância média no plano de trabalho (fotópica) resultou em uma média de 685lux, onde 98.6% dos sensores registraram iluminâncias acima de 300 lux, e a iluminância fotópica, em relação ao conforto visual, atingiu a iluminância média de 617lux. Observa-se que o pico do espectro da simulação encontra-se em torno de 480nm.

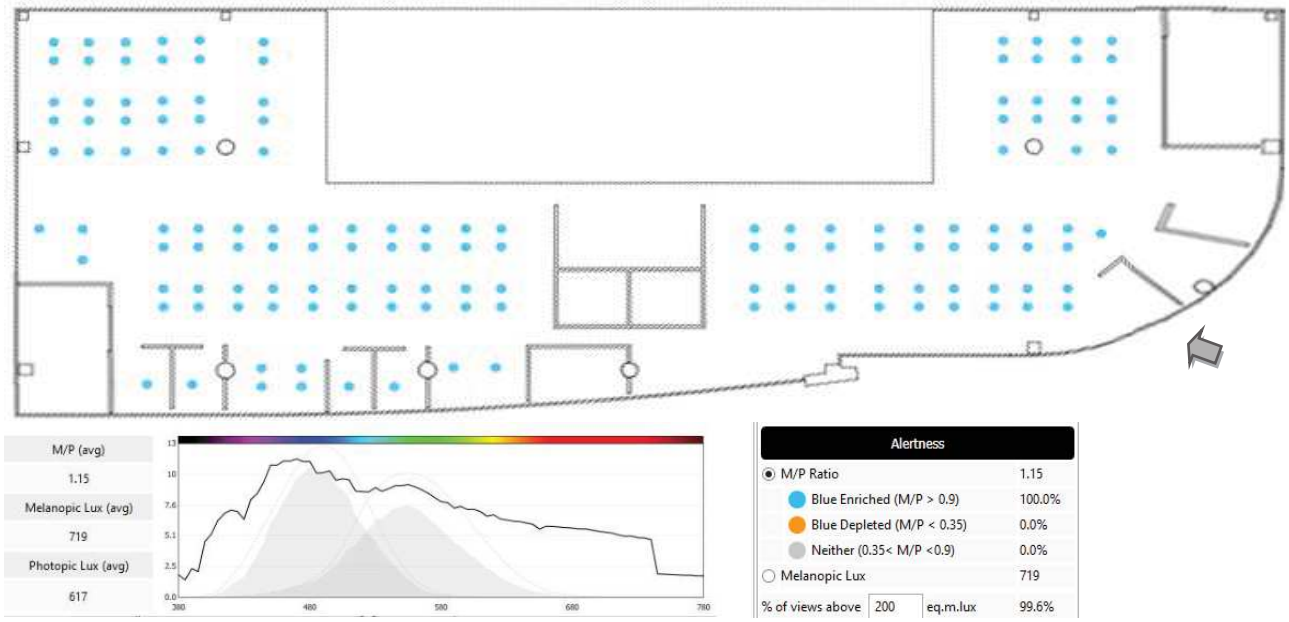

Figura 6 Resultado da simulação apenas com iluminação natural.

4. RESULTADOS

As simulações demonstram que a iluminância média no plano de trabalho foi 100 lux menor na simulação com iluminação natural, comparada com à artificial na simulação com a ferramenta ALFA. No entanto, a fonte luminosa mais estimulante para o ritmo circadiano, foi a luz natural, onde 100% das direções visuais analisadas ficaram acima de 0.9 (razão M/P).

De acordo com Reinhart (2014), um ambiente com iluminação lateral equipado com persianas possibilita o alcance da luz natural entre aproximadamente 1 ou 2 vezes a altura da janela, a partir do piso, e espaços com aberturas sem elementos de proteção solar aumentam o alcance máximo da luz natural para 2.5 vezes. A figura 10 indica, em laranja, o alcance da luz natural 1 vez e meia a altura da abertura, que coincide com o pé direito do pavimento, e em amarelo, o alcance máximo de 2.5 vezes o pé direito. Pode-se perceber que a maioria das estações de trabalho se encontram em uma faixa com distância de até 2.5 vezes a altura da janela. O alto desempenho do edifício analisado justifica-se devido ao pavimento ser pouco profundo, onde a distância máxima é de 15.20m em relação à abertura.

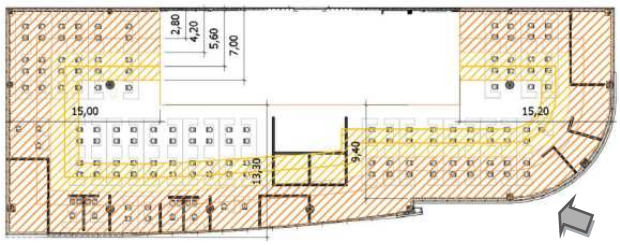

Figura 7 Análise do alcance da luz natural, segundo Reinhart (2014) e indicação das distâncias das fachadas até o núcleo de circulação vertical (core).

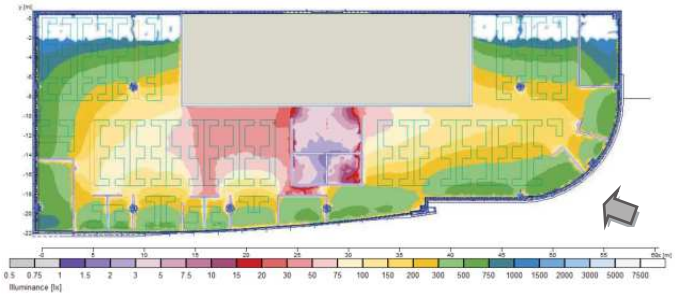
Figura 8 Simulação da iluminação natural no dia 21.03 às 9h.

A figura 11 demonstra a simulação de iluminação natural no dia 21.03 às 9h com o *software* Relux Desktop. A iluminância média do pavimento ficou bastante próxima à obtida com a ferramenta ALFA (660 lux) e a iluminância máxima registrada foi de 9.660 lux. A simulação demonstra que a região até 2.5 vezes a altura da abertura possui iluminância em torno de até 100 lux nas áreas sem obstrução de divisórias.

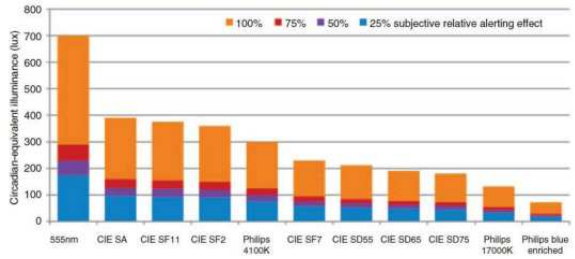

Figura 9 Iluminância necessária para atingir o efeito de alerta relativo desejado para uma seleção de iluminantes bem conhecida. Fonte: ANDERSEN; MARDALJEVIC; LOCKLEY, 2012, p. 44.

Andersen, Mardaljevic e Lockley (2012) fizeram uma comparação entre fontes luminosas e iluminância circadiana equivalente e demonstraram que para se atingir o mesmo efeito no estado de alerta, para fontes distintas, é necessária iluminâncias, muitas vezes, mais altas. A figura 12 indica que 190 lux de uma fonte luminosa D65 (luz natural 6500K) corresponderia a 300 lux de uma lâmpada Phlips 4100K.

As simulações nas ferramentas ALFA e Relux Desktop empregaram um céu claro (D75) e, para se obter o mesmo efeito de alerta da região com aproximadamente 180 lux (luz natural), seria necessário 300 lux de uma fonte luminosa de 4100K. Embora a iluminância média no plano de trabalho tenha sido maior na simulação apenas com iluminação artificial, a distribuição fotométrica da luminária pode indicar uma razão para o decréscimo na razão M/P, além das limitações relativas ao espectro da fonte luminosa.

A análise do alcance da luz natural indicou que os usuários do edifício com maior acesso à luz natural no período matutino (das 8h às 12) tendem a apresentar ritmos circadianos regulares e, consequentemente, melhores noites de sono. Estes indivíduos, provavelmente apresentarão menor incidência de depressão e desmotivação, e maior bem-estar, caso as persianas não fiquem fechadas.

As distâncias da regra consagrada de 2.5 vezes a altura da abertura podem auxiliar o projeto de edifícios, indicando a região com melhor desempenho para o ritmo circadiano. No entanto, iluminâncias acima de 3000 lux são propensas a causar desconforto visual e térmico (NABIL; MARDALJEVIC, 2005). O excesso de luz identificado no estudo é decorrente de uma alta proporção de área envidraçada e área opaca *(window-to wall-ratio*, WWR). A WTNU possui, com exceção da fachada nordeste, 60% de WWR em todas as suas fachadas, o que é considerado excessivo, de acordo com Goia (2016) e Mangkuto, Rohmah e Asri (2016). Os autores propõem, que seja considerado, no máximo 40% de proporção entre áreas envidraçadas e opacas, para edifícios situados nos trópicos.

As proteções solares externas são recursos que podem ser adotados para minimizar a entrada de luz solar direta e reduzir o ofuscamento durante os períodos críticos do ano, mesmo quando o edifício empregar vidros de controle solar. O traçado das máscaras do entorno (Fator de Visão de Céu, FVC) é fundamental para que o projetista encontre soluções para o aproveitamento da luz natural e, consequentemente, beneficie os usuários do edifício.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pode-se verificar a importância da luz natural no projeto de edifícios de escritórios, no que tange às funções do corpo e, consequentemente, a saúde e o bem-estar dos seus ocupantes. A ferramenta ALFA permite a análise dos efeitos não-visuais da luz e possibilita a compreensão do estímulo luminoso que cada indivíduo está exposto, em ambientes internos, sendo que o resultado dos cálculos da razão M/P permitem explorar a direção da visão dos usuários da edificação e, consequentemente, estimar o seu comportamento e bem-estar.

As pesquisas referenciadas neste trabalho demonstram a importância da iluminação natural para a obtenção de um ritmo circadiano regular, cujos efeitos extrapolam o ambiente de trabalho. Indivíduos com, ao menos, 4 horas de exposição à luz natural no período da manhã demonstram melhor sono à noite, reportam menos depressão e menos interrupção durante o sono. O ritmo circadiano em sincronia com os períodos de claro-escuro do mundo exterior favorece a manutenção dos ritmos fisiológicos e comportamentais, beneficiando o desempenho do indivíduo e a sensação de bem-estar.

Este estudo analisa a tipologia de edifício de escritórios mais recorrente por meio de um exemplar (WTorre Nações Unidas, WTNU), demonstrando o seu potencial circadiano. A análise aponta que a diretriz consagrada para projetos que contemplem iluminação natural (até 2.5 vezes a altura da abertura) podem indicar também a melhor área para ocupação, no que tange o ritmo circadiano dos usuários do espaço. No entanto, as iluminâncias excessivas próximas às aberturas propiciam o uso de persianas internas e, consequentemente, reduzem o aproveitamento da iluminação natural, podendo comprometer o ritmo circadiano. Neste cenário há prejuízos para o estado de alerta dos ocupantes dos edifícios e, a longo prazo, danos à saúde.

Para que a iluminação natural se torne um recurso viável, é necessário que os edifícios peles de vidro utilizem a razão WWR de acordo com a latitude da cidade em questão. É importante avaliar não apenas o edifício em si, mas questões pertinentes à geometria da insolação, como o Fator de Visão de Céu e os períodos críticos de insolação das fachadas, quando as proteções solares são indispensáveis.

Como continuidade deste trabalho, serão realizados estudos comparativos entre as principais tipologias de edifícios de escritórios e o potencial circadiano de cada um, assim como estudos que consigam delinear uma proporção entre áreas envidraçadas e opacas para edifícios de escritórios em São Paulo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSEN, M; MARDALJEVIC, J; LOCKLEY, Sw. A framework for predicting the non-visual effects of daylight – Part I: photobiology- based model. **Lighting Research & Technology**, [S.L.], v. 44, n. 1, p. 37-53, 13 fev. 2012. SAGE Publications. http://dx.doi.org/10.1177/1477153511435961.

Aoki H; Yamada N; Ozeki Y; Yamane H; Kato N. Minimum light intensity required to suppress nocturnal melatonin concentration in human saliva. **Neurosci Lett**. 1998 Aug 14;252(2):91-4. doi: 10.1016/s0304-3940(98)00548-5.

BORISUIT, A; LINHART, F; SCARTEZZINI, J-L; MÜNCH, M. Effects of realistic office daylighting and electric lighting conditions on visual comfort, alertness and mood. **Lighting Research & Technology**, [S.L.], v. 47, n. 2, p. 192-209, 22 abr. 2014. SAGE Publications. http://dx.doi.org/10.1177/1477153514531518.

BROWN, T. M. Melanopic illuminance defines the magnitude of human circadian light responses under a wide range of conditions. **Journal of Pineal Research**, Nova York, v. 69, n. 1, p. 1-14, 19 abr. 2020. Wiley. http://dx.doi.org/10.1111/jpi.12655.

CORBIOLI, Nanci. Passarelas unem edifícios com áreas de laje diferentes. **Projeto Design**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 58-65, abr. 2009.

FIGUEIRO, M.G. NAGARE, R.; PRICE, L.L.A. 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.

FIGUEIRO, M.G.; STEVERSON, B.; HEERWAGEN, J.; KAMPSCHROER, K.; HUNTER, C.M.; GONZALES, K.; PLITNICK, B.; REA, M. S. The impact of daytime light exposures on sleep and mood in office workers. **Sleep Health**, [S.L.], v. 3, n. 3, p. 204-215, jun. 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.sleh.2017.03.005.

FOSTER, Russell. How Light Exposure Affects Human Health. In: SLL LIGHTING RESEARCH & TECHNOLOGY SYMPOSIUM, 1., 2020, Londres. **How Light Exposure Affects Human Health**. Londres: CIBSE, 2020. Disponível em: https://bit.ly/32jnNlj. Acesso em: 02 nov. 2020.

FRANK, Horst. **Electromagnetic spectrum -de.svg.** 2005. Disponível em: https://bit.ly/3uBu6fU. Acesso em: 15 mar. 2021.LOK, Corie. Seeing without seeing. **Nature**, S.L., v. 469, n. 1, p. 284-285, 20 jan. 2011. Disponível em: https://go.nature.com/3mLFseM. Acesso em: 02 fev. 2021.

GOIA, F. Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential. **Solar Energy**, [S.L.], v. 132, p. 467-492, jul. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.031.

KAIDA, K.; TAKAHASHI, M.; HARATANI, T.; OTSUKA, Y.; FUKASAWA, K.; NAKATA, A. Indoor Exposure to Natural Bright Light Prevents Afternoon Sleepiness. **Sleep**, [S.L.], v. 29, n. 4, p. 462-469, abr. 2006. Oxford University Press (OUP). http://dx.doi.org/10.1093/sleep/29.4.462.

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. 301-3014, set. 2007.

MAIEROVA, Lenka. Public Lighting, Public Health. 2018 VII. **Lighting Conference of The Visegrad Countries (Lumen V4)**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-5, set. 2018. IEEE. http://dx.doi.org/10.1109/lumenv.2018.8521032.

MANGKUTO, R.A.; ROHMAH, M.; ASRI, A.D. Design optimisation for window size, orientation, and wall reflectance with regard to various daylight metrics and lighting energy demand: a case study of buildings in the tropics. **Applied Energy**, [S.L.], v. 164, p. 211-219, fev. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.046.

MARDALJEVIC, J; HESCHONG, L; LEE, E.S. Daylight metrics and energy savings. **Lighting Research + Technology**. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. California, 2009.

MILLER, N.J.; IRVIN, A.L. M/P ratios – Can we agree on how to calculate them? **IES: Illuminating Engineering Society**, [S.I.], 27 set. 2019. Disponível em: https://bit.ly/2RmXqIF. Acesso em: 15 mar. 2021.

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.41-59, 1 jan. 2005. Cambridge University Press (CUP). http://dx.doi.org/10.1191/1365782805li128oa. Disponível em: < https://bit.ly/3dV3KyL>. Acesso em: 12 abr. 2021.

OYAMADA, Maria Kiyoko. Fototransdução: ativação, inativação e adaptação. **Rbm Revista Brasileira de Medicina**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 68-72, 20 nov. 2015. Disponível em: https://bit.ly/3235P6g. Acesso em: 08 mar. 2021.

PISANI, Maria Augusta Justi; FIGUEIREDO, Erika Ciconelli de. Edifícios de escritórios em São Paulo: tipologias de 1979 a 2010. **Anais 11ª Conferência Internacional da LARES - Latin American Real Estate Society**. São Paulo: EDUSP, 2011. 1-12.

REINHART, C. **Daylighting Handbook I**. USA: MIT, 2014.

REA M.S. Window blind occlusion: a pilot study. **Building Environment**, 19, 1984, p. 133-7.

SOLEMMA. **Adaptive Lighting for Alertness**. 2021. Disponível em: https://www.solemma.com/alfa. Acesso em: 15 fev. 2021.

TICLEANU, C; LITTLEFAIR, P. **Circadian lighting**. Londres: CIBSE, 2020. 30 p.

VEJA. **Entenda por que você fica com sono depois de comer.** 2019. Disponível em: https://bit.ly/3d9gTVV. Acesso em: 23 mar. 2021.

WTORRE NAÇÕES UNIDAS. **O edifício**. 2012. Disponível em: https://wtnu.com.br/estrutura.php. Acesso em: 24 jan. 2021.

ZAIDI, F.H.; HULL, J.T.; PEIRSON, S.N.; WULFF, K.; AESCHBACH, D.; GOOLEY, J.J.; BRAINARD, G.C.; GREGORY-EVANS, K; RIZZO, J.F.; CZEISLER, C.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.