ANÁLISE DA PERFORMANCE LUMÍNICA DE TUBOS DE LUZ NATURAL EM AMBIENTE DE COZINHA

Gabriel de Sousa Santos (1); Andréa Coelho Laranja (2)
(1) Arquiteto Urbanista, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo PPGAU, gabriel.santos.95@edu.ufes.br, Universidade Federal de Espírito Santo
(2) Doutora., Professora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, andrea.laranja@ufes.br, Universidade Federal de Espírito Santo

RESUMO
Os tubos de luz natural proporcionam impactos positivos no ambiente interno com a melhora da performance lumínica. Estes podem vir a ser incorporados em conjuntos habitacionais como forma de suprir as necessidades de iluminação de ambientes de cozinha, os quais possuem grande demanda por iluminação. Desta forma, o objetivo desta pesquisa foi analisar a performance lumínica de tubos de luz natural em ambiente de cozinha, em Vitória – ES. Para isto, a metodologia dividiu-se em três etapas: definição de modelos de referência para tubo de luz natural e ambiente de cozinha; definição de dez modelos de tubos de luz natural aplicados a um modelo de cozinha; definição dos parâmetros para as simulações e das métricas ALNe e IULN. As simulações foram realizadas no software Troplux 8, no qual os modelos dividiram-se em três grupos de análise: Grupo 01 (sistema com tubo de 1,2m de comprimento, sem joelho e inclinações de 37°, 69° e 103°), Grupo 02 (sistema com tubo de 1,2m de comprimento, com joelho e inclinações de 37°, 69° e 103°) e Grupo 03 (sistema com tubo de 1,65m de comprimento, com joelho e inclinações de 0°, 39°, 69° e 101°). Os resultados demonstraram que a inclinação dos tubos de luz natural, exerceu maior influência na variação da iluminação no ambiente interno, do que o comprimento do tubo e a adição de joelhos, no qual modelos de menor inclinação (0°, 37° e 39°) obtiveram os piores resultados. Por outro lado, o aumento de 27,28% no comprimento do tubo causou um inexpressivo decaimento da iluminação natural. Constatou-se também que a adição de joelho, em tubos de luz natural de mesma inclinação, contribuiu com até 20% de melhora na performance lumínica do ambiente interno.

Palavras-chave: tubos de luz natural, cozinha, simulação computacional.

ABSTRACT
Natural light pipes provide positive impacts on the indoor environment with improved lighting performance. These may be incorporated into housing developments as a way to meet the lighting needs of kitchen environments, which have a high demand for lighting. In this way, the objective of this research was to analyze the luminous performance of natural light pipes in a kitchen environment, in Vitória - ES. For this, the methodology was divided into three stages: definition of reference models for natural light pipes and kitchen environment; definition of ten models of natural light pipes applied to a kitchen model; definition of parameters for simulations and ALNe and IULN metrics. The simulations were carried out in the Troplux 8 software, in which the models were divided into three analysis groups: Group 01 (system with a 1.2 m long pipe, without elbow and inclinations of 37°, 69° and 103°), Group 02 (system with a 1.2m long pipe, with elbow and inclinations of 37°, 69° and 103°) and Group 03 (system with a 1.65m long pipe, with elbow and inclinations of 0°, 39 °, 69° and 101°). The results showed that the inclination of the natural light pipes exerted a greater influence on the variation of lighting in the indoor environment than the length of the pipe and the addition of elbows, in which models with a lower inclination (0°, 37° and 39°) had the worst results. On the other hand, the 27.28% increase in the length of the pipe caused an insignificant decline in natural lighting. It was also found that the addition of a elbow, in natural light pipes of the same inclination, contributed with up to 20% improvement in the luminous performance of the internal environment.

Keywords: natural light pipes, kitchen, computer simulation.

1. INTRODUÇÃO

Os tubos de luz natural são dispositivos de captação e condução da luz solar por pequenas ou grandes distâncias e são utilizados na construção civil com vistas a uma melhor eficiência energética. Geralmente instalados em ambientes que recebem pouca ou nenhuma luz natural, estes dispositivos podem provocar impactos positivos tanto econômicos, quanto para a saúde e bem-estar dos usuários (MALET-DAMOUR et al., 2022; MALET-DAMOUR et al., 2020).

Quanto aos impactos econômicos, estudos demonstram que os tubos de luz natural aliam um menor ganho de calor com uma boa capacidade de disponibilizar iluminação natural para os ambientes internos, diminuindo assim os custos demandados por carga de resfriamento, assim como por iluminação artificial (PLESHKOV et al., 2020; HENG et al., 2020: SERN et al., 2022; MALET-DAMOUR et al., 2022).

A respeito dos benefícios para a saúde e bem-estar dos usuários, pesquisas confirmam que estes dispositivos não alteram o espectro da luz visível, permitindo ainda a percepção da variação climática externa trazendo benefícios psicofisiológicos ligados aos sistemas circadiano e cognitivo (WIRZ-JUSTICE, et al., 2021; KNOOP, et al., 2020; MÜNCH, et al., 2020; MALET-DAMOUR et al., 2022).

Porém, mesmo sabendo que o desempenho lumínico dos ambientes internos é um dos requisitos para a habitabilidade e que a norma NBR 15575-1 recomenda o adequado aproveitamento da luz natural para edificações habitacionais (ABNT, 2013), constatam-se exemplos de habitações de interesse social com baixa performance lumínica. Isto pode ser observado nas pesquisas de Bortoli et al. (2020) nas quais usuários de conjuntos habitacionais defrontados com residências que não atendem suas necessidades, utilizam-se da prática da autoconstrução. Os autores acrescentam que, uma das motivações para a autoconstrução relatada pelos usuários é o "desconforto ambiental" decorrente dentre outros, da inadequada iluminação natural do ambiente.

Neste sentido, o incremento de tubos de luz natural em ambientes de grande demanda por iluminação como as cozinhas, pode contribuir com a resiliência de habitações de interesse social, por garantir luz de forma satisfatória.

2. OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é analisar a performance lumínica de tubos de luz natural em ambiente de cozinha, em Vitória – ES.

3. MÉTODO

A metodologia está dividida em três etapas: definição de modelos de referência para cozinha e tubo de luz natural; definição de 10 modelos simplificados de tubos de luz natural, divididos em três grupos com variações de comprimento do condutor, ausência ou presença de joelho e ângulo de inclinação do condutor, inseridos em um único modelo de cozinha; definição dos parâmetros e das métricas ALNe (Autonomia de Luz Natural Espacial) e IULN (Iluminância Útil de Luz Natural) para simulações computacionais, no software Troplux 8 (CABUS et al., 2020).

3.1. Modelos de referência

Na primeira etapa, foram definidos modelos de referência de cozinha e tubo de luz natural. A cozinha foi definida a partir de medidas mínimas indicadas nos códigos de obras das capitais da Região Sudeste do Brasil e na NBR 15575-1 (ABNT, 2013). Em seguida, foi verificada a equivalência entre estas dimensões levantadas, com as dimensões recorrentes de cozinha em projeto de habitação de interesse social unifamiliar no estado do Espírito Santo. Quanto ao modelo de tubo de luz natural, este foi definido com base nas características comuns deste sistema, disponibilizado no mercado para ambientes residenciais.

3.1.2 Modelo de cozinha

A partir dos códigos de obras das capitais da Região Sudeste, foram observados o pé direito e a menor dimensão possível de ser adotada para o modelo de cozinha, Tabela 1. No que diz respeito a NBR 15575 – 1 (ABNT, 2013), a mesma recomenda que o mobiliário mínimo de uma cozinha seja constituído por: fogão, geladeira, pia de cozinha, armário sobre a pia, gabinete, apoio para refeições (2 pessoas). Para tanto, o mesmo documento indica dimensões mínimas necessárias à distribuição do mobiliário e circulação, descritos no Tabela 2. No que se refere às dimensões recorrentes de cozinha adotadas em projeto de habitação de interesse social no estado do Espírito Santo, verificou-se o emprego de cozinha de formato retangular, com largura e comprimento de respectivamente 2m e 2,8m, com estrutura do telhado inclinado aparente sem forro, Figura 1.

Tabela 1 - Dimensões mínimas para Códigos de Obras das capitais da Região Sudeste do Brasil.

DIMENSÕES MÍNIMAS DE COZINHAS					
Capital	**Área (m²)**	**Dimensão (m)**	**Pé direito (m)**	**Outro**	**Fonte**
Vitória	-	-	2,30	Possibilitar a inscrição de círculo com diâmetro de 1,50 m	VITÓRIA, 1998
São Paulo	-	-	2,50	Possibilitar a inscrição de círculo com diâmetro de 1,50 m	SÃO PAULO, 2017
Belo Horizonte	-	-	2,60	-	BELO HORIZONTE, 2009
Rio de Janeiro	-	-	-	-	RIO DE JANEIRO, 2019

Tabela 2 – Dimensões mínimas de cozinha segundo a NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

DIMENSÕES MÍNIMAS DE COZINHAS			
Item	**Largura (m)**	**Profundidade (m)**	**Observações**
Pia	1,20	0,50	Largura mínima da cozinha, de forma que comporte as dimensões sugeridas para mobiliário e circulação: 1,50 m
Fogão	0,55	0,60	-
Geladeira	0,70	0,70	-
Circulação	0,85	-	-
Armário sobre a pia e gabinete	-	-	Espaço obrigatório para móvel
Apoio para refeição (2 pessoas)	-	-	Espaço opcional para móvel

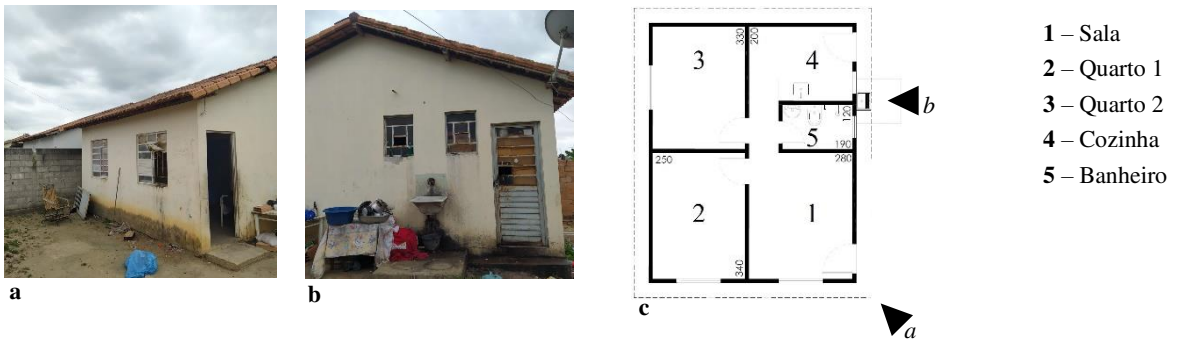


Figura 1 – Vista externa “a” e “b” e planta baixa de habitação de interesse social adotada no Espírito Santo, com destaque para o ambiente de cozinha.

Desta forma, partindo-se da premissa que o modelo de cozinha deve permitir a organização do mobiliário mínimo descrito pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013), mantendo uma circulação mínima de 0,85m, levando em consideração as dimensões mínimas indicadas pelos códigos de obras analisados e as medidas empregadas em habitação de interesse social no Espírito Santo, foram adotadas para a cozinha as seguintes dimensões, comprimento e largura de respectivamente 3m e 2m, pé direito de 2,3m e área de 6m², Figura 2.



Figura 2 – Planta baixa ambientada de cozinha, com mobiliário mínimo e dimensões adotadas.

3.1.2 Modelo de tubo de luz natural

A disponibilidade de luz natural em ambientes que fazem uso de tubos de luz natural é impactada pelos seus componentes principais (Figura 3), sendo eles o coletor (I), que capta a luz solar para o tubo de forma passiva ou ativa; o tubo (II), que conduz a luz solar por reflexões; o difusor (III), que por sua vez difunde a luz no ambiente interno (MALET-DAMOUR et al., 2019; MALET-DAMOUR et al., 2020). Desta forma, tomando por referência os diâmetros dos tubos disponibilizados no mercado, bem como as características do coletor e difusor, Tabela 3, foi definido o modelo de referência com sessão quadrada com as seguintes características: lado de 0,20m; coletor e difusor com vidro incolor plano de 4mm; refletância especular interna do tubo de 0.98. A área de sessão quadrada aproxima-se da área da sessão circular de 0,23m, correspondente a uma medida mínima e formato usual dentre as empresas.

Tabela 3 – Características de tubos de luz natural disponibilizados no mercado.

TUBOS DE LUZ NATURAL					
Empresa	**Coletor**	**Tubo**		**Difusor**	**Fonte**
		Diâmetro	Refletância espec.		
Monodraught	Vidro duplo ou cúpula acrílica	0,23m;	0,98	Vidro opaco ou policarbonato	MONODRAUGHT, 2023
Solatube	Cúpula acrílica	0,25m;	0,997	-	SOLATUBE, 2023
VELUX	Vidro temperado 4mm ou cúpula acrílica	0,35m;	0,99	Policarbonato	VELUX, 2023
Lightway	Cristal	0,152;	0,998	Vidro	LIGHTWAY, 2023
Solarspot	-	0,25m;	0,997	-	SOLARSPOT, 2023

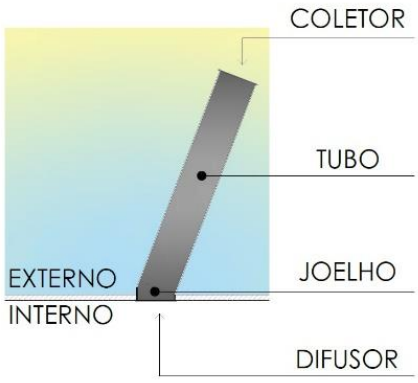


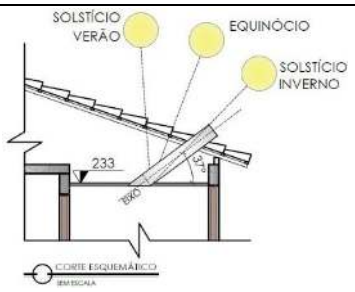
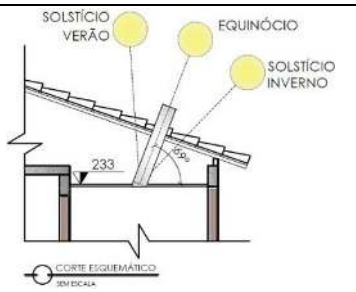
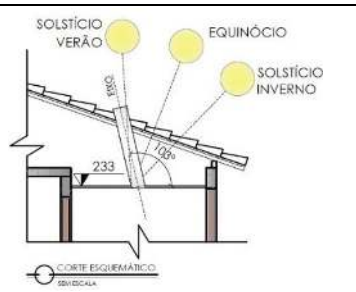
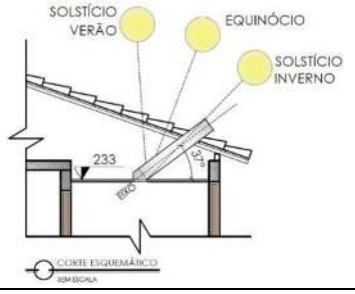
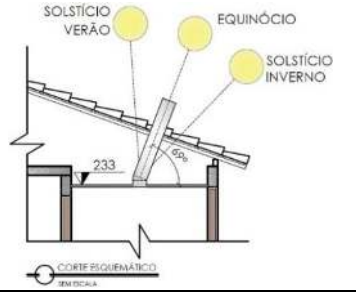
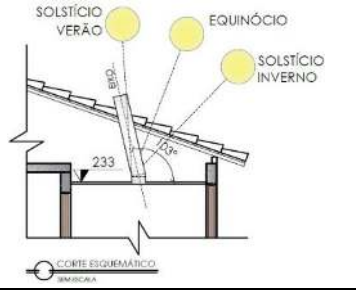
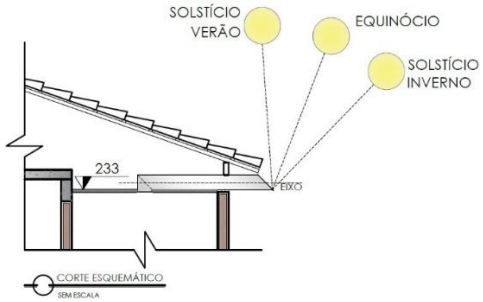
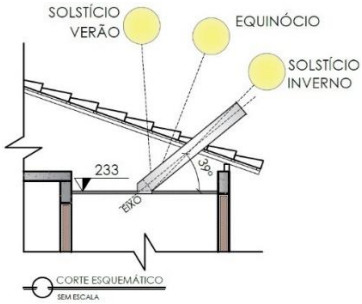
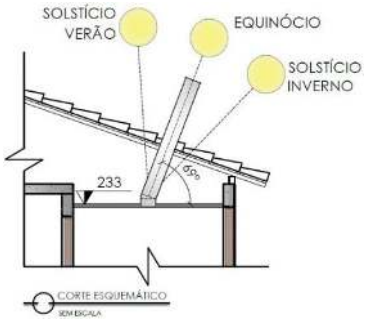
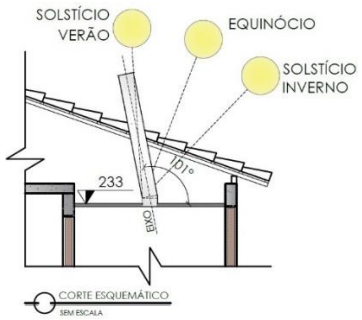
Figura 3 – Modelo simplificado de Tubo de luz natural

3.3. Modelos para Simulações

Nas simulações para o modelo de cozinha adotado, não foram consideradas as contribuições lumínicas das aberturas laterais. Os tubos de luz natural foram posicionados ao centro do ambiente. Com vistas a avaliar a influência da performance do tubo de luz natural em função da variação de inclinação, a presença ou ausência de joelho e o comprimento do tubo, os modelos foram separados em grupos: O Grupo 01 reúne modelos que possuem tubo com comprimento de 1,2m, inclinações de 37°, 69° e 103°, sem joelho; O Grupo 02 reúne modelos que possuem tubo com comprimento de 1,2m, inclinações de 37°, 69° e 103°, com joelho; O Grupo 03 reúne modelos que possuem tubo com comprimento de 1,65m, inclinações de 0°, 39°, 69° e 101°, com joelho.

Levando em consideração a "trajetória solar aparente" para a cidade de Vitória – ES, as inclinações propostas para os tubos de luz natural consideraram a maior altura solar, às 12h, nos solstícios de inverno e verão bem como nos equinócios de primavera e outono, sendo que para os equinócios, foram adotadas inclinações que impeçam a incidência de radiação direta no difusor. Quanto aos joelhos, estes foram modelados com área interna de aproximadamente 0.10m². Por fim, a variação do comprimento foi em função da construção de modelo de tubo de luz natural em posição horizontal, de forma que o coletor estivesse para além de um beiral de 0,40m (medida usual de beiral em habitações de interesse social). A seguir, a Tabela 4 apresenta os modelos em seus devidos grupos.

Tabela 4 – Modelos de tubos de luz em seus respectivos grupos.

GRUPO 01		
Grupo com três modelos de tubos de luz natural sem joelho.		
M1 – 1.2 – 37° - SJ	**M2 – 1.2 – 69° - SJ**	**M3 – 1.2 – 103° - SJ**
		
GRUPO 02		
Grupo com três modelos de tubos de luz natural com acréscimo de joelho.		
M4 – 1.2 – 37° - J	**M5 – 1.2 – 69° - J**	**M6 – 1.2 – 103° - J**
		
GRUPO 03		
Grupo com quatro modelos de tubos de luz natural com joelho e aumento do comprimento do tubo.		
M7– 1.65 – 0° - J	**M8 – 1.65 – 39° - J**	
		
M9– 1.65 – 69° - J	**M10– 1.65 – 101° - J**	
		

3.2. Parâmetros e Métricas

As simulações foram processadas a partir de dez modelos estruturados no software TropLux 8 (CABÚS et al., 2020), sob céu com distribuição dinâmica da capital Vitória - ES, latitude 20°19'10"S, clima tropical úmido, por possuir características climáticas semelhantes às cidades de implantação das unidades residenciais do Programa de Habitação do Governo do Estado do Espírito Santo (ESPÍRITO SANTO, 2016).

As simulações ocorreram para o intervalo do dia compreendido entre 7h30 e 17h30, em todos os dias do ano. A orientação do coletor do tubo de luz natural foi proposta para Norte, visto ser esta a orientação na qual ocorre maior acesso da radiação solar direta na parte coletora do sistema. Foi proposta uma malha ortogonal composta por 20 pontos de medição da iluminância (Figura 4), prevista pela IES LM-83-12

(ILLUMINATING..., 2012), com altura do plano de medição à 0,75m do piso. Quanto às refletâncias das superfícies internas, foram adotados valores máximos indicados pela NBR ISSO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013), descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores máximos de Refletância segundo a NBR 15575 – 1 (ABNT, 2013).

Superfície	Refletância
Piso	0,5
Parede	0,8
Teto	0,9

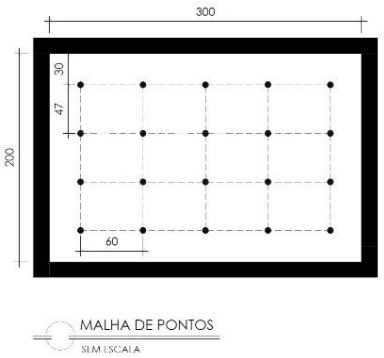


Figura 4 – Malha ortogonal de 20 pontos para medição da iluminância.

As métricas utilizadas foram ALNe, desenvolvido pela Illuminating Engineering Society of North America (2012) e a IULN, proposta por Nabil e Mardaljevic (2005). Para o ALNe, admitiram-se os valores mínimo de 60lx, intermediário de 90lx e superior de 120lx, indicados pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013). Para a IULN, admitiram-se os intervalos: E < 100 (iluminância insuficiente); 100 < E < 300 (iluminância suficiente com necessidade de iluminação complementar); 300 < E < 3000 (iluminância suficiente); E >3000 (iluminância excessiva); 100lx ≤ E ≤ 3000lx (intervalo útil).

Os resultados das simulações permitiram análises comparativas, a partir dos percentuais de ALNe e IULN, entre os dez modelos propostos, divididos em três grupos, com vistas a identificar os modelos que apresentaram os melhores desempenhos. A análise da ALNe permitiu investigar o percentual de área em que os níveis mínimos, intermediário, ou superior de iluminância, segundo NBR 15575-1 (ABNT, 2013), é atingido em mais de 50% das horas/ano. Por outro lado, a IULN permitiu analisar o percentual anual de instantes em que a iluminância atinge os intervalos: E < 100; 100 < E < 300; 300 < E < 3000; E >3000. Também foi possível analisar o percentual mensal em que a IULN atinge a intervalo útil de 100lx ≤ E ≤ 3000lx.

4. RESULTADOS

Seguem os resultados das simulações para as métricas ALNe, tendo por referência os valores de 60lx, 90lx e 120lx indicados pela NBR 15575 (ABNT, 2013), bem como os intervalos de iluminância da IULN, os quais demonstraram a performance anual de dez modelos de tubos de luz natural, divididos em 3 grupos de análise conforme similaridade.

A Tabela 6 apresenta percentuais de ALNe, tendo por referência o valor limite de 60lx. Para todos os modelos é possível observar intervalos de horas, no início da manhã e final da tarde, com performance insuficiente, acarretando grande demanda de iluminação artificial para a realização das atividades. Isto provavelmente é decorrente do fato de que nestes horários a altura solar é pequena, dificultando o acesso da parcela da radiação solar direta no tubo. Por outro lado, a performance dos modelos melhora nos demais horários de maior altura solar, no qual apenas para modelo "M1 – 1.2 - 37° - SJ", observa-se uma performance insuficiente em alguns horários do dia (8h30; 14h30; 15h30). Isso provavelmente é decorrente de que este modelo não dispõe de joelho, já que é observada uma melhora de performance nos modelos aos quais foram adicionados este elemento em função das novas reflexões na porção condutora do tubo. Assim, é possível constatar que o uso do tubo de luz natural garante cerca de 5 a 8 horas do dia com 100% da área de trabalho provida de iluminância mínima de 60lx.

Tabela 6 – Percentuais de ALNe sob nível mínimo de 60lx.

MODELO / HORA		07:30	08:30	09:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30	17:30
M1 – 1.2 – 37° - SJ		0%	65%	100%	100%	100%	100%	100%	85%	60%	0%	0%
M2 – 1.2 – 69° - SJ		5%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	5%	0%
M3 – 1.2 – 103° - SJ		10%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	95%	10%	0%

M4 – 1.2 – 37° - J		5%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0%	0%
M5 – 1.2 – 69° - J		10%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	10%	0%
M6 – 1.2 – 103° - J		10%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	10%	0%
M7 – 1.65 – 0° - J		0%	90%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	90%	0%	0%
M8 – 1.65 – 39° - J		0%	95%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	5%	0%
M9 – 1.65 – 69° - J		10%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	10%	0%
M10 – 1.65 – 101° - J		10%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	10%	0%

ESCALA	100%	95%	80%	75%	60%	55%	40%	35%	20%	15%	5%	0%

As Tabelas 7 e 8 apresentam percentuais de ALNe, tendo por referência os valores limites intermediário e superior, respectivamente 90lux e 120lux. Como já era esperado, há uma redução da quantidade de horas que conseguem garantir 100% da área de trabalho para valores de 90lux e 120lux. É possível verificar que os modelos de menor inclinação "M1 – 1.2 – 37° - SJ" e "M7 – 1.65 – 0° - J" (horizontal) apresentam a pior performance em todos os horários simulados. Quando analisados os modelos pertencentes aos grupos (G1, G2 e G3), pode-se observar que os modelos do grupo G2 (com joelho – 1.2m) e G3 (com joelho – 1.65m) obtiveram melhores resultados, com melhoras de performance em até 60%, se comparados ao grupo G1 (sem joelho – 1.2m). Esta melhora da performance, provavelmente decorre da mudança de direção da luz refletida por meio do joelho, permitindo a incidência da luz de forma mais ampla no plano de trabalho. Quanto à diferença de comprimento, tubos mais compridos (G3) apresentaram um decaimento pouco expressivo (5%), o que provavelmente é decorrente do aumento de reflexões da luz na parte interna do tubo (porção condutora). Quanto à variação da inclinação, esta mostrou-se mais determinante para a performance dos modelos, nos quais modelos com menor inclinação (0°, 37° e 39°) apresentaram os piores resultados, com ocorrências de até 80% de decaimento da área suprida por iluminância de 90lx e 120lx. Isto se confirma com as piores performances obtidas pelos modelos "M1 – 1.2 – 37° - SJ" e "M7 – 1.65 – 0° - J". Desta forma, sendo a inclinação o fator mais preponderante para uma melhor performance do tubo, esta deve ser definida a partir da compreensão das trajetórias solares.

Tabela 7 – Percentuais de ALNe sob nível intermediário de 90lx.

MODELO / HORA		**07:30**	**08:30**	**09:30**	**10:30**	**11:30**	**12:30**	**13:30**	**14:30**	**15:30**	**16:30**	**17:30**
M1 – 1.2 – 37° - SJ		0%	0%	55%	70%	70%	85%	65%	55%	0%	0%	0%
M2 – 1.2 – 69° - SJ		0%	50%	95%	100%	100%	100%	100%	100%	60%	0%	0%
M3 – 1.2 – 103° - SJ		0%	35%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	40%	0%	0%
M4 – 1.2 – 37° - J		0%	60%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	55%	0%	0%
M5 – 1.2 – 69° - J		0%	85%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	90%	0%	0%
M6 – 1.2 – 103° - J		0%	65%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	70%	0%	0%
M7 – 1.65 – 0° - J		0%	5%	60%	90%	90%	90%	95%	65%	0%	0%	0%
M8 – 1.65 – 39° - J		0%	50%	90%	100%	100%	100%	100%	100%	65%	0%	0%
M9 – 1.65 – 69° - J		0%	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	65%	0%	0%
M10 – 1.65 – 101° - J		0%	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	60%	0%	0%

ESCALA	100%	95%	80%	75%	60%	55%	40%	35%	20%	15%	5%	0%

Tabela 8 – Percentuais de ALNe sob nível superior de 120lx.

MODELO / HORA		**07:30**	**08:30**	**09:30**	**10:30**	**11:30**	**12:30**	**13:30**	**14:30**	**15:30**	**16:30**	**17:30**
M1 – 1.2 – 37° - SJ		0%	0%	5%	40%	50%	45%	35%	5%	0%	0%	0%

M2 – 1.2 – 69° - SJ		0%	5%	80%	95%	100%	95%	85%	70%	10%	0%	0%
M3 – 1.2 – 103° - SJ		0%	0%	65%	85%	95%	95%	80%	75%	5%	0%	0%
M4 – 1.2 – 37° - J		0%	0%	60%	90%	95%	95%	80%	65%	0%	0%	0%
M5 – 1.2 – 69° - J		0%	25%	90%	95%	100%	100%	100%	90%	20%	0%	0%
M6 – 1.2 – 103° - J		0%	15%	90%	100%	100%	100%	95%	80%	10%	0%	0%
M7 – 1.65 – 0° - J		0%	0%	10%	25%	60%	55%	35%	10%	0%	0%	0%
M8 – 1.65 – 39° - J		0%	0%	55%	85%	85%	95%	80%	65%	0%	0%	0%
M9 – 1.65 – 69° - J		0%	20%	85%	90%	95%	95%	85%	85%	15%	0%	0%
M10 – 1.65 – 101° - J		0%	5%	85%	95%	100%	100%	100%	75%	10%	0%	0%

ESCALA	100%	95%	80%	75%	60%	55%	40%	35%	20%	15%	5%	0%

A Figura 5 apresenta percentuais anuais para os intervalos de IULN. É possível observar que percentuais para o intervalo excessivo são insignificantes, isso provavelmente em função da geometria do tubo, que por possuir uma parcela condutora alongada, dificulta a incidência de radiação solar direta. Os modelos com menor inclinação (0°, 37° e 39°) apresentam os piores resultados, visto que o intervalo insuficiente (E<100) chega a quase 75%, dos quais a pior performance é observada no modelo "M1 – 1.20 – 37° - SJ". Por outro lado, os modelos com maior inclinação (69°, 101° e 103°), sobretudo os que possuem joelho, apresentam as melhores performances com aumento de até 15% no intervalo (100<E<300) e de até 5% no intervalo (300<E<3000). Dessa forma, é possível concluir que a adoção de tubos de iluminação natural com maiores inclinações (69°, 101° e 103°), associadas a joelhos, melhoram a performance lumínica do ambiente interno demandando menor quantidade de iluminação artificial.

As Figuras 6, 7 e 8, apresentam resultados mensais de IULN, faixa útil 100lx ≤ E ≤ 3000lx. De uma forma geral, os modelos de maior inclinação obtiveram melhor performance ao longo do ano, dos quais os modelos do Grupo 2 apresentam os melhores resultados. No entanto, nos meses de menor altura solar é possível observar que estes mesmos modelos tiveram um decaimento em tordo de 30%, provavelmente decorrente da menor incidência de radiação solar direta no tubo. Por outro lado, os modelos de menor inclinação possuem a pior performance ao longo do ano, dos quais o modelo com pior resultado é o "M1 – 1.2 – 37° - SJ" (Grupo 1), juntamente com o modelo "M7 – 1.65 – 0° - J" (Grupo 3) o qual apresenta decaimento bastante expressivo nos meses de maior altura solar, provavelmente decorrente de uma menor incidência de radiação solar direta no coletor do tubo, visto que este está orientado para Norte.

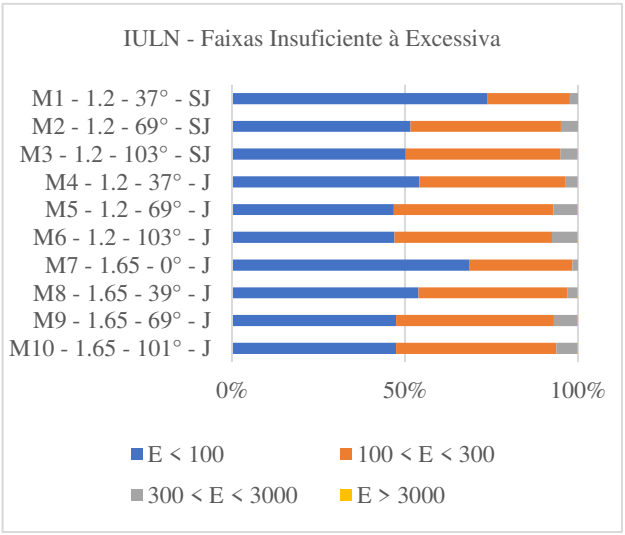


Figura 5 – Percentuais anuais de IULN para as faixas insuficiente, suficiente com necessidade de iluminação complementar, suficiente e excessiva.

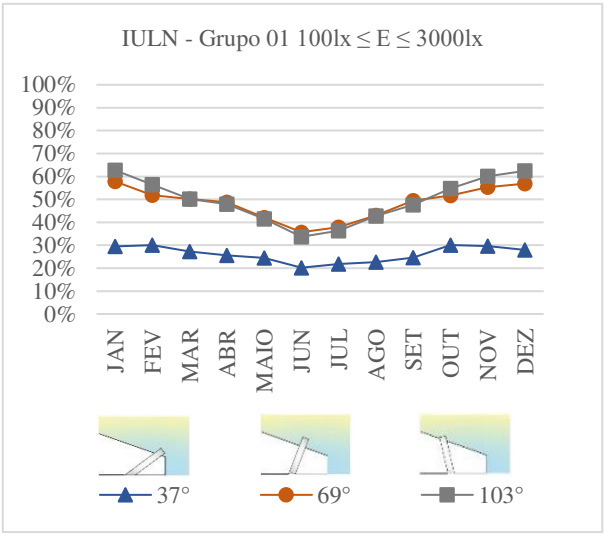


Figura 6 – Percentuais mensais de IULN, faixa útil 100lx ≤ E ≤ 3000lx, para três modelos do Grupo 01.

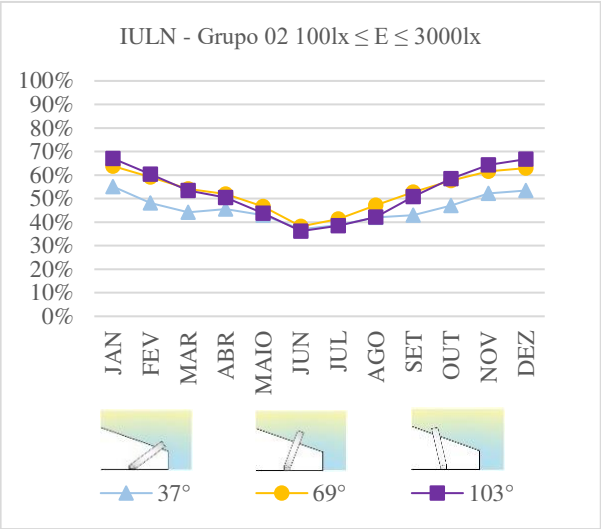


Figura 7 – Percentuais mensais de IULN, faixa útil 100lx ≤ E ≤ 3000lx, para três modelos do Grupo 02.

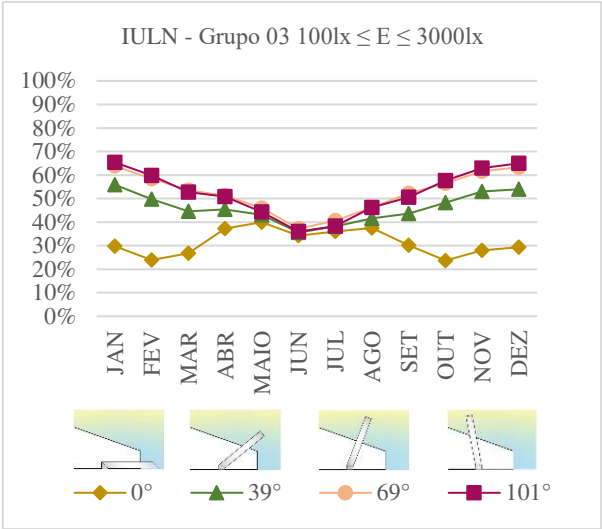


Figura 8 – Percentuais mensais de IULN, faixa útil 100lx ≤ E ≤ 3000lx, para quatro modelos do Grupo 03.

5. CONCLUSÕES

O propósito deste artigo consistiu em analisar a performance lumínica de tubo de luz natural em ambiente de cozinha sob o céu dinâmico de Vitória - ES. As simulações computacionais foram realizadas para dez modelos agrupados em três grupos de análise Grupo 1 (comprimento de 1.2m, sem joelho, inclinações de 37°, 69° e 103°), Grupo 2 (comprimento de 1.2m, com joelho, inclinações de 37°, 69° e 103°) e Grupo 3 (comprimento de 1.65m, com joelho, 0°, 39°, 69° e 101°).

Nas análises do índice ALNe, para os valores limite de 60lx, 90lx e 120lx, percentuais insuficientes foram encontrados em todos os modelos, em horários de menor altura solar, no início da manhã e final da tarde. Este fato acarreta grande demanda de iluminação artificial para a realização das atividades nestes períodos. Os tubos de luz natural permitem atender o limite mínimo de 60lx, conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2013), em 100% da área de trabalho durante 5 a 8 horas do dia, entretanto, para os limites de 90lx e 120lx, este intervalo é reduzido para 0 a 6 horas. Os Modelos de pior performance que possuem as menores inclinações, são: “M1 – 1.2 – 37° - SJ”, “M4 – 1.2 – 37° - J”, “M7 – 1.65 – 0° - J” e “M8 – 1.65 – 39° - J”. Isto provavelmente decorre de baixas inclinações que dificultam a entrada da radiação direta na porção condutora do tubo em horários de maior altura solar. Quanto às variações de comprimento e presença de joelho, o aumento do comprimento implica em uma redução de performance insignificante, enquanto que a adição do joelho provoca uma melhora de performance em até 60%. Por fim, o modelo de melhor performance para o índice ALNe, foi o “M5 – 1.2 – 69° - J’, o mesmo possui joelho, comprimento menor e sua inclinação tem por referência a altura solar no horário de 12h00 durante os equinócios de primavera e outono.

Quanto às análises de IULN, nenhum dos modelos apresentam instantes no intervalo de iluminância excessiva, isso demonstra menor possibilidade de contrastes lumínicos dentro do ambiente de cozinha. Para esta métrica também foi possível observar que os modelos de menor inclinação apresentaram os piores resultados, como também uma melhora de performance a partir da adição de joelhos e decaimento pouco expressivo com o aumento do comprimento do tubo.

A partir dos resultados encontrados, é possível concluir que os tubos de iluminação natural podem ser utilizados de forma a complementar os níveis de iluminância do ambiente interno.

Conclui-se desta forma, que quatro quesitos devem ser observados na concepção do tubo, a sua orientação associada à inclinação, a configuração da entrada do tubo, o comprimento da porção condutora da luz e a adoção de joelhos.

Destaca-se que a metodologia aplicada a esta pesquisa foi voltada para um ambiente específico na cidade de Vitória, considerando as orientações para o coletor do tubo de iluminação natural em função da Geometria Solar de Vitória, devendo desta forma ser adaptado às características de outras localidades quando se fizerem novas investigações.

Como estudos futuros, pretende-se investigar a performance do tubo de luz a partir da variação de sua orientação associada à inclinação, a configuração da entrada do tubo, o comprimento da porção condutora e a adoção de joelhos, bem como a inserção de dispositivos refletores para direcionamento da radiação solar, para uma melhor performance do tubo de iluminação natural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15715-1: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais.** ABNT, Rio de Janeiro, 2013.

BELO HORIZONTE. Lei n°9725 - **Institui o Código de Edificações do Município de Belo Horizonte e Dá Outras Providências.** Poder executivo, 2009**.** Disponível em: https://leismunicipais.com.br/codigo-de-obras-belo-horizonte-mg. Acesso em: 24 abr. 2023

BORTOLI, K. C. R. de; VILLA, S. B. **Adequação ambiental como atributo facilitador da resiliência no ambiente construído em Habitações de Interesse Social.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 20, n. 1, p. 391-422, jan./mar. 2020. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000100381. Acesso em: ago. 2022.

CABÚS, Ricardo C.; RIBEIRO, Pedro V. S.; BASTOS, Orestes M. K.; SILVA, Luís F. **TropLux 8**. Titulares: Universidade Federal de Alagoas, Instituto Lumeeiro. BR512020002087-9. Criação: 10 set. 2019. Registro: 06 out. 2020.

ESPÍRITO SANTO. **Unidades Habitacionais Construídas no Espírito Santo de 2003 a 2009.** Instituto Jones dos Santos Neves,2016. Disponível em: https://sedurb.es.gov.br/Media/Sedurb/PDF/CARTILHA%20IJSN-IDURB-1.pdf Acesso em: 24 abr. 2023

HENG, C. Y. S.; LIM, Yaik-Wah; OSSEN, Dilshan Remaz. **Horizontal light pipe transporter for deep plan high-rise office daylighting in tropical climate.** Building and Environment, v. 171, p. 106645, 2020.

ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **LM-83-12: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)**. New York, 2012.

KNOOP, Martine et al. **Daylight: what makes the difference?**. Lighting Research & Technology, v. 52, n. 3, p. 423-442, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1177/1477153519869758. Acesso em: 7 ago. 2022.

LIGHTWAY. **Sun Tunnels**. 2023. Disponível em: https://www.lightway.cz/english/. Acesso em: 24 abr. 2023

MALET-DAMOUR, Bruno; BIGOT, Dimitri; BOYER, Harry. **Technological review of tubular daylight guide system from 1982 to 2020.** European Journal of Engineering and Technology Research, v. 5, n. 3, p. 375-386, 2020.

MALET-DAMOUR, Bruno; FAKRA, Damien Ali Hamada. **Thermal and spectral impact of building integrated Mirrored Light Pipe to human circadian rhythms and thermal environment.** International Journal of Sustainable Energy, v. 41, n. 5, p. 492-513, 2022.

MONODRAUGHT. **Natural Lighting: Sunpipe**. 2023. Disponível em: https://www.monodraught.com/. Acesso em: 24 abr. 2023

MÜNCH, Mirjam et al. **The role of daylight for humans: gaps in current knowledge**. Clocks & sleep, v. 2, n. 1, p. 61-85, 2020. Disponível em: https://www.mdpi.com/2624-5175/2/1/8. Acesso em: 7 ago. 2022.

NABIL, Azza; MARDALJEVIC, John. **Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings.** Lighting Research & Technology, v. 37, n. 1, p. 41-57, 2005.

PLESHKOV, Sergei et al. **Solving air conditioning problems in a design project using energy-efficient daylighting systems based on hollow tubular light guides.** In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. p. 052030.

RIO DE JANEIRO. **Lei complementar n° 198 – Institui o Código de Obras e Edificações Simplificado do Município do Rio de Janeiro** – COES. Câmara Municipal, Poder Executivo, 2019. Disponível em: https://lancamentos-rj.com/wp-content/uploads/2020/03/Novo-C%C3%B3digo-de-Obras-e-Edifica%C3%A7%C3%B5es-do-Rio.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023

SÃO PAULO. **Secretaria Municipal de Urbanismo e Licenciamento - SMUL. Código de obras e edificações: lei nº 16.642, de 9 de maio de 2017; decreto nº 57.776 de 7 de julho de 2017**; COE ilustrado. São Paulo: SMUL, 2017

SERN, Christopher Heng Yii; LIOU, Louis Ting Kwang; FADZIL, Sharifah Fairuz Syed. **Daylighting Performance of Integrated Light Shelf with Horizontal Light Pipe System for Deep Plan High-Rise Office in Tropical Climate.** Journal of Daylighting, v. 9, n. 1, p. 83-96, 2022.

SOLARSPOT. **Iluminação Natural**. 2023. Disponível em: https://www.termipol.pt/comercializacao/iluminacao-natural-e desenfumagem/solarspot-iluminacao-natural/. Acesso em: 24 abr. 2023

SOLATUBE. **Tubular Skylights.** 2023. Disponível em: https://solatube.com/. Acesso em: 24 abr. 2023

VELUX. **Túneis de Luz**. 2023. Disponível em: https://www.velux.pt/produtos/tuneis-de-luz. Acesso em: 24 abr. 2023

VITÓRIA. **Lei n° 4821 – Institui o Código de Edificações do Município de Vitória e Dá Outras Providências.** Palácio Jerônimo Monteiro, 1998. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/codigo-de-obras-vitoria-es. Acesso em: 24 abr. 2023

WIRZ-JUSTICE, Anna; SKENE, Debra J.; MÜNCH, Mirjam. **The relevance of daylight for humans**. Biochemical pharmacology, v. 191, p. 114304, 2021.