

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Análise do impacto energético da adoção de sistemas de sombreamento
interno e dimerização em edifícios comerciais**

Leandro Yuiti Yamada

São Paulo
2017

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Análise do impacto energético da adoção de sistemas de sombreamento
interno e dimerização em edifícios comerciais**

Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Graduação em Engenharia

Leandro Yuiti Yamada

Orientador: Prof. Dr. Alberto
Hernandez Neto

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2017

Catálogo-na-publicação

Yamada, Leandro Yuiti

Análise do impacto energético da adoção de sistemas de sombreamento interno e dimerização em edifícios comerciais. / L. Yuiti Yamada. - São Paulo, 2017.

65p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Sombreamento interno 2. Dimerização 3. Persianas 4. Economia de energia (Simulações) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica III. t.

Resumo

Este trabalho possui o objetivo de analisar o impacto de duas estratégias na redução do consumo de energia elétrica em edifícios comerciais. A primeira delas é o sombreamento interno automático, que a partir de valores pré-estabelecidos de radiação solar, controla a quantidade de iluminação incidente na região interna destes edifícios, por meio do fechamento ou abertura da persiana. Já a segunda, é a dimerização, estratégia que permite o controle da potência da iluminação artificial interna dos edifícios, com base no nível de iluminação natural incidente no ambiente, reduzindo o consumo de energia elétrica. A análise do impacto energético será realizado por meio de simulações no *software EnergyPlus*, em que serão comparados as curvas de consumo do edifício em que as estratégias foram adotadas, em relação a um prédio base.

Palavras-chaves: Sombreamento interno, dimerização, persiana, economia de energia.

Abstract

The objective of this paper is to analyze the impact of two strategies for the reduction of the consumption of the electrical energy in commercial buildings. The first one is the automatic internal shading, a sort of blind installed in the windows, that controls the amount of incident illumination inside the building through preset values of solar radiation by closing or opening of the blinds. The second one is the lighting dimming, strategy that allows to control the power of the internal artificial lighting of the buildings, based on the natural illumination level inside the ambient, reducing the consumption of the electrical energy. The analysis of the energy impact will be conducted through simulations in the software called Energy Plus, that produce the curves of the energy consumption of the building, where the strategies have been adopted.

Keywords: Internal shading, dimming, blind, energy saving.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Consumo de energia elétrica por região. Dados retirados da ANEEL [1]	1
Figura 2 – Disponibilidade de luz no plano de trabalho para diferentes valores de <i>WWR</i> (fachada sul) [10].	6
Figura 3 – Demanda por energia elétrica para iluminação para diferentes valores de <i>WWR</i> [10].	6
Figura 4 – Venezianas (a), persianas verticais (b) e cortinas de rolos (c) [12]. .	8
Figura 5 – Ângulos de inclinação utilizados [13].	9
Figura 6 – Efeito do ângulo de inclinação para o ganho de calor em diferentes cidades [13].	9
Figura 7 – Impacto do ângulo de inclinação no consumo de energia elétrica do sistema de iluminação para diferentes cidades [13].	10
Figura 8 – Curvas de consumo de energia elétrica de sistemas com e sem dimerização [27].	13
Figura 9 – Edifício base	14
Figura 10 – Matriz de consumo desagregado da edificação base	18
Figura 11 – Matriz de consumo desagregado do sistema de climatização . . .	19
Figura 12 – Consumo energético do sistema de iluminação	19
Figura 13 – Consumo energético dos equipamentos instalados	20
Figura 14 – Consumo energético do sistema de climatização	20
Figura 15 – Posicionamento dos sensores para os cenários 1 (a) e 2 (b)	23
Figura 16 – Luminosidade do cenário 1 (21/01 – 8h)	23
Figura 17 – Luminosidade do cenário 1 (21/01 – 12h)	24
Figura 18 – Luminosidade do cenário 1 (21/01 – 15h)	24
Figura 19 – Luminosidade do cenário 1 (21/06 – 8h)	25
Figura 20 – Luminosidade do cenário 1 (21/06 – 12h)	25
Figura 21 – Luminosidade do cenário 1 (21/06 – 15h)	26
Figura 22 – Comparação do consumo anual de energia elétrica dos sistemas analisados	26
Figura 23 – Luminosidade do cenário 2 (21/01 – 8h)	27
Figura 24 – Luminosidade do cenário 2 (21/01 – 12h)	28
Figura 25 – Luminosidade do cenário 2 (21/01 – 15h)	28
Figura 26 – Luminosidade do cenário 2 (21/06 – 8h)	29
Figura 27 – Luminosidade do cenário 2 (21/06 – 12h)	29

Figura 28 – Luminosidade do cenário 2 (21/06 – 15h)	30
Figura 29 – Comparação do consumo anual de energia elétrica dos sistemas analisados	31
Figura 30 – Comparação de consumo de energia elétrica de edifício estudado (C1) em relação ao edifício com dimerização	34
Figura 31 – Comparação de consumo de energia elétrica de edifício estudado (C2) em relação ao edifício com dimerização	35
Figura 32 – Modelo do Edifício esbelto (a) e posicionamento dos sensores de iluminação (b)	37
Figura 33 – Modelo do Edifício perimetral 3m (a) e posicionamento dos sensores de iluminação (b)	38
Figura 34 – Luminosidade do edifício esbelto (21/01 – 08h)	39
Figura 35 – Luminosidade do edifício esbelto (21/01 – 12h)	39
Figura 36 – Luminosidade do edifício esbelto (21/01 – 15h)	39
Figura 37 – Luminosidade do edifício esbelto (21/06 – 08h)	40
Figura 38 – Luminosidade do edifício esbelto (21/06 – 12h)	40
Figura 39 – Luminosidade do edifício esbelto (21/06 – 15h)	41
Figura 40 – Luminosidade do edifício perimetral 5m (21/01 – 08h)	41
Figura 41 – Luminosidade do edifício perimetral 5m (21/01 – 12h)	42
Figura 42 – Luminosidade do edifício perimetral 5m (21/01 – 15h)	42
Figura 43 – Luminosidade do edifício perimetral 5m (21/06 – 08h)	43
Figura 44 – Luminosidade do edifício perimetral 5m (21/06 – 12h)	43
Figura 45 – Luminosidade do edifício perimetral 5m (21/06 – 15h)	44
Figura 46 – Consumo de Energia Elétrica de Iluminação no Verão para os Edifícios Perimetrais e o Esbelto	45
Figura 47 – Consumo de Energia Elétrica de Iluminação no Inverno para os Edifícios Perimetrais e o Esbelto	45
Figura 48 – Consumo de Energia Elétrica de Iluminação no Verão para os Edifícios Perimetral 5m, Esbelto e Cenário 1	46
Figura 49 – Consumo de Energia Elétrica de Iluminação no Inverno para os Edifícios Perimetral 5m, Esbelto e Cenário 1	47

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificações dos sistemas de sombreamento [11].	7
Tabela 2 – Densidade ocupacional	15
Tabela 3 – Densidade típica de carga de equipamentos elétricos	16
Tabela 4 – Consumo energético segmentado por sistemas	17
Tabela 5 – Atuação do Sistema de Sombreamento (São Paulo)	32
Tabela 6 – Atuação do Sistema de Sombreamento (Porto Alegre)	32
Tabela 7 – Atuação do Sistema de Sombreamento (Natal)	32
Tabela 8 – Consumo anual de energia elétrica (kWh) para os edifícios estudados	48
Tabela 9 – Tarifas de Energia da AES Eletropaulo	49
Tabela 10 – Custo energético dos edifícios C1, Esbelto, P_5m e Base	50
Tabela 11 – Estimativa do custo de implantação do sistema de dimerização . .	51
Tabela 12 – Cálculo do <i>Payback</i> do projeto	51

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
3	METODOLOGIA	4
4	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	5
4.1	Sombreamento	7
4.1.1	Ângulo de inclinação	8
4.1.2	Controle	11
4.2	Dimerização	11
5	PARÂMETROS DA EDIFICAÇÃO	14
5.1	Geometria do edifício	14
5.2	Densidade ocupacional	15
5.3	Iluminação	15
5.4	Equipamentos elétricos	15
5.5	Sistema de climatização	16
6	RESULTADO DA SIMULAÇÃO DO EDIFÍCIO BASE . . .	17
7	EDIFÍCIO COM DIMERIZAÇÃO	22
7.1	Disposição dos sensores	22
7.1.1	Cenário 1	23
7.1.2	Cenário 2	27
8	EDIFÍCIO COM SOMBREAMENTO	32
9	EDIFÍCIO COM SOMBREAMENTO E DIMERIZAÇÃO . .	34
10	ANÁLISE DETALHADA DA OPERAÇÃO DE SISTEMA DE DIMERIZAÇÃO	37
10.1	Edifício esbelto	37
10.2	Edifício perimetral	38
10.3	Estudo de iluminação no ambiente	38
10.3.1	Edifício esbelto	38

10.3.2	Edifício perimetral 5m	41
10.4	Consumo de energia elétrica de iluminação	44
10.5	Consumo total de energia elétrica	47
11	CUSTO DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE DIMERIZAÇÃO	49
11.1	Custo Tarifário	49
11.2	Payback do Investimento	50
12	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	53

1 Introdução

De forma a contextualizar o cenário em que este trabalho se baseia, buscou-se informações sobre o consumo de energia elétrica no Brasil. A partir de dados da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) [1], sabe-se que de janeiro a outubro de 2016 foram consumidos aproximadamente 197 TWh de energia elétrica no país, em que sua distribuição por região geográfica pode ser visto na figura 1. Com base nesta figura, nota-se a relevância da região Sudeste no consumo de energia elétrica, representando 47% do total consumido no país.

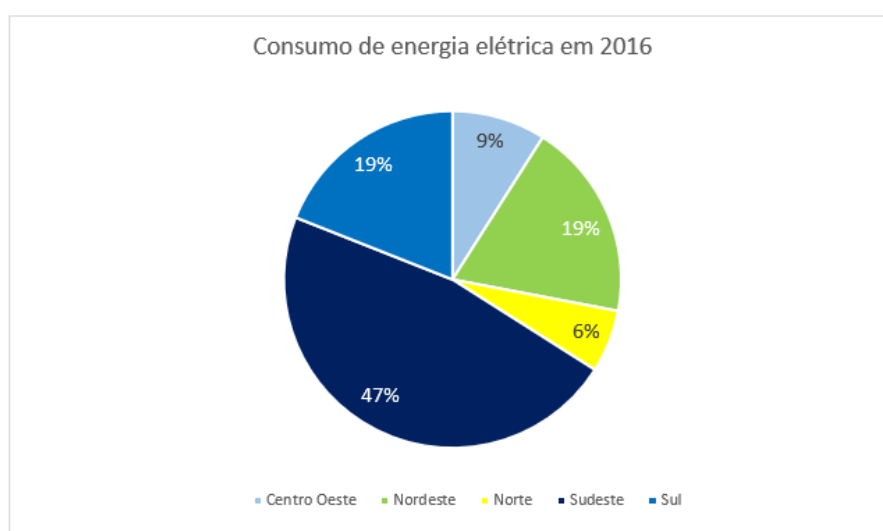


Figura 1 – Consumo de energia elétrica por região. Dados retirados da ANEEL [1]

Além da divisão do consumo por região, a ANEEL também realiza uma divisão por classe de consumo, em que a classe denominada “comercial, serviços e outros” corresponde por 24% do consumo no país, inferior somente ao consumo residencial. Ademais, analisando somente a participação do setor comercial e de serviços, verifica-se que a região Sudeste representa 52% do consumo do país, fator que enaltece a importância desta região em relação ao consumo de energia elétrica no país [1].

A partir destes dados, nota-se a relevância do consumo de energia elétrica pelo setor comercial e de serviços, principalmente na região Sudeste, onde a cidade de São Paulo pode ser destacada, por ser a principal cidade do país no setor analisado.

Por conta disso, estratégias que possam reduzir este consumo tornam-se interessante para os administradores destes edifícios, que terão uma diminuição no custo fixo

do empreendimento e também, para as fornecedoras de energia elétrica, por precisarem de uma capacidade instalada menor para atender a demanda da cidade.

Ressalta-se que as estratégias abordadas, detalhadas posteriormente, serão o sombreamento interno automático e a dimerização. A primeira possui a finalidade de retardar o efeito da radiação solar no edifício, por meio da instalação de persianas internas nas fachadas do edifício, evitando um impacto direto da radiação solar com a região interna do edifício. Dessa forma, distribui-se mais uniformemente a carga térmica do edifício ao longo do dia. Já a segunda, aproveitando-se da iluminação natural do dia, possui a função de diminuir a potência das lâmpadas utilizadas, de forma a reduzir o consumo de energia elétrica utilizado para iluminar o ambiente.

2 Objetivos

O objetivo deste relatório é fazer um estudo do impacto no consumo de energia elétrica devido a aplicação das estratégias de sombreamento automático e dimerização da iluminação artificial. Isso será feito com base na comparação do consumo mensal e anual de um edifício base em relação à um edifício em que as estratégias foram implantadas, na cidade de São Paulo. Ressalta-se que essa comparação será realizada por meio de dados gerados em simulações realizadas no *software EnergyPlus*.

Em seguida, será realizado um estudo de sensibilidade dos *setpoints* do sistema de sombreamento e dimerização, de forma a definir qual o ponto ótimo de fechamento e de abertura das persianas e do nível de intensidade luminosa das lâmpadas.

Posteriormente, serão feitas análises do comportamento do sistema de dimerização frente a diversas configurações do edifício, de forma a determinar o melhor posicionamento dos sensores de iluminação, para obtenção da maior eficiência energética.

Por fim, será realizada uma análise financeira do projeto, a fim de verificar o tempo de retorno da implantação das estratégias selecionadas.

3 Metodologia

Inicialmente, realizou-se uma pesquisa bibliográfica referente às estratégias de economia de energia adotadas, de forma a entender como estas funcionam e como poderiam contribuir para uma economia no consumo de energia elétrica dos edifícios.

Em seguida construiu-se o modelo base do edifício a ser simulado no *software EnergyPlus*, com base nas normas ASHRAE 90.1 [2] e ABNT NBR16401 [3]. A utilização destas normas serão descritas com mais detalhes na seção 5 (Parâmetros da edificação).

A partir da simulação deste modelo, foi possível obter as curvas de consumo mensal e anual deste edifício base, de forma a servir de comparação em relação às curvas de consumo dos edifícios em que serão implantados as estratégias de redução do consumo de energia elétrica.

Com isso, realizou-se análises de economia de consumo energético e financeira, a fim de verificar quais edifícios apresentariam melhores resultados em relação ao cenário base.

4 Levantamento bibliográfico

Com o objetivo de contextualizar o problema estudado, realizou-se uma pesquisa sobre os tipos de sombreamento existente, os parâmetros que influenciam na escolha do modelo correto e o impacto no consumo de energia elétrica com a utilização desta estratégia. Além disso, realizou-se uma pesquisa sobre o sistema de dimerização, de forma a também avaliar o impacto desta estratégia na utilização de energia elétrica.

Pesquisas realizadas apontam que edifícios são responsáveis por aproximadamente 40% do consumo de energia elétrica no mundo [4]. Sendo que 20 a 30% do consumo destas edificações refere-se a utilização do sistema de iluminação do ambiente [5]. Por conta disso, deve-se evitar o uso excessivo do sistema de iluminação artificial, aproveitando-se da iluminação natural.

Iluminação natural é um fator importante para um conforto visual interno, além de contribuir positivamente para satisfação e produtividade das pessoas [6]. Porém, podem trazer desconforto térmico e ofuscamento por conta de grandes áreas envidraçadas [7-9]. Ademais, aumentam a carga térmica da construção, podendo exigir maior consumo de energia do sistema de climatização.

De forma a desfrutar dos benefícios da luz natural, sem comprometer o conforto térmico e o consumo de energia elétrica, torna-se necessário um estudo do impacto da razão entre a área envidraçada e a área da parede (*WWR - Window to Wall Ratio*) na necessidade de iluminação artificial e no aumento da carga térmica do edifício.

Tzempelikos e Athienitis [10] realizaram um estudo, em Montreal às 14 horas no mês de Junho, acerca da disponibilidade de luz natural em um plano de trabalho (*lux*) e da demanda por energia de iluminação (MJ) para alguns valores de *WWR*, conforme visto nas figura 2 e 3, respectivamente.

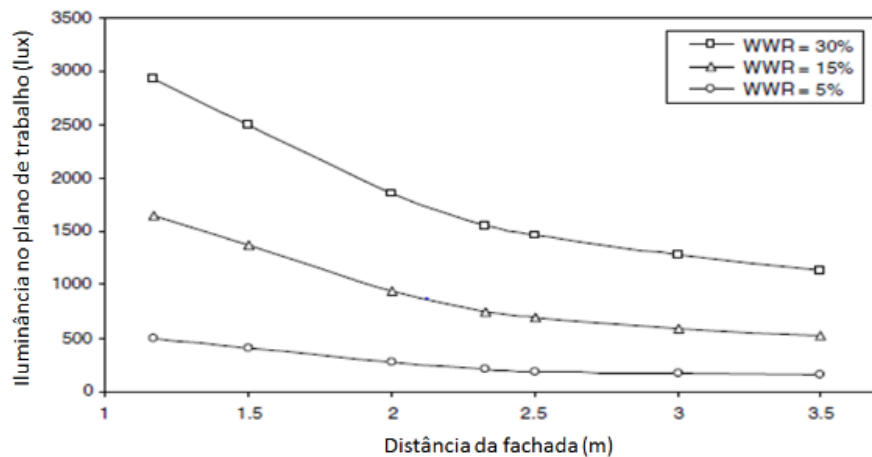


Figura 2 – Disponibilidade de luz no plano de trabalho para diferentes valores de WWR (fachada sul) [10].

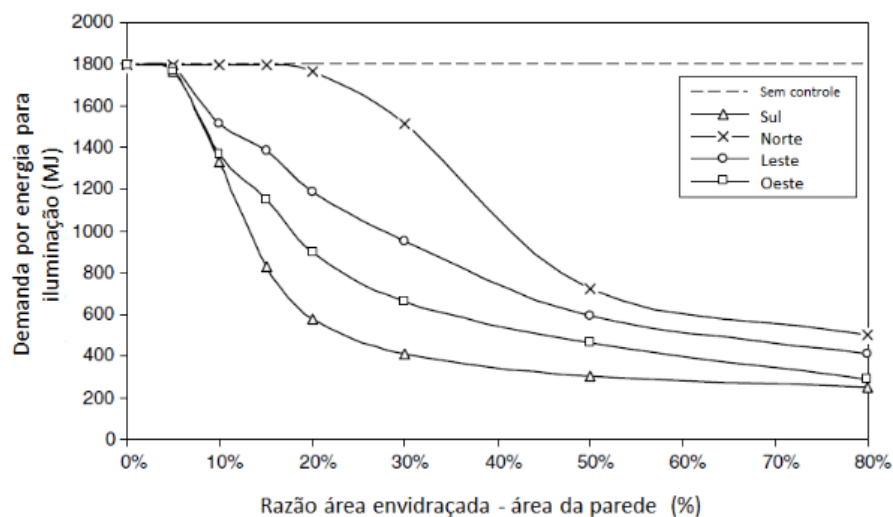


Figura 3 – Demanda por energia elétrica para iluminação para diferentes valores de WWR [10].

Analisando a figura 2 acima, verifica-se que para porcentagens maiores de áreas envidraçadas, há uma maior disponibilidade de iluminação natural no ambiente. Isto poderá causar um aumento no consumo de energia elétrica por parte dos sistemas de refrigeração, devido a um aumento da carga térmica do edifício e a uma diminuição para o sistema de iluminação artificial, por conta da presença de iluminação natural, com o risco de causar ofuscamento.

Já analisando a figura 3 acima, nota-se que para maiores valores de WWR, menores são as necessidades por iluminação artificial, pois há uma disponibilidade de

no mínimo 500 *lux* na maior parte do experimento, valor abaixo do qual o sistema de iluminação era ativado. Além disso, verifica-se a influência da orientação da fachada do edifício, visto que para valores de 30% de *WWR*, há uma redução no consumo de aproximadamente 78% para a fachada Sul, ao passo de uma redução aproximada de 11% para a fachada Norte.

Entretanto, com o objetivo de amenizar estes efeitos térmicos e luminosos, utilizam-se as estratégias de sombreamento e de dimerização, de forma a priorizar os benefícios da presença da luz natural. Assim, primeiramente, será dado um enfoque no sombreamento e, posteriormente, no sistema de dimerização.

4.1 Sombreamento

Dispositivos de sombreamentos podem ser fixos ou móveis, além de serem classificados mediante o local de instalação, podendo ser instalados no interior ou exterior dos edifícios e na região entre os vidros da janela. A tabela 1 abaixo resume estas classificações de forma simplificada.[11]

Tabela 1 – Classificações dos sistemas de sombreamento [11].

Classificação dos Sistemas de Sombreamento	Local de Instalação		
	Externo	Intermediário	Interno
Dispositivos Fixos	x	-	x
Dispositivos Móveis	x	x	x

Analisando a tabela 1, nota-se que os dispositivos de sombreamento fixos podem ser instalados internamente ou externamente à construção. Estes dispositivos bloqueiam uma parte da radiação solar, contribuindo para a redução na carga térmica do edifício e consequentemente, na redução da utilização do sistema de refrigeração, além de diminuir o ofuscamento. Entretanto, não há a possibilidade de regulação deste sistema conforme aumenta-se ou diminui a iluminação natural, podendo causar um aumento no consumo de energia elétrica utilizadas nas lâmpadas do ambiente, por exemplo. Dessa forma, é necessário a definição correta do tipo e do local de instalação do dispositivo a ser utilizado, em função da disponibilidade de luz do dia e do conforto térmico e visual do ambiente [12].

Já os dispositivos de sombreamento móveis, possuem a vantagem de alterar sua configuração, de forma a beneficiar momentaneamente sua utilização, podendo

bloquear parte da luz natural em dias de verão e permitir sua entrada em dias de inverno, contribuindo para o consumo de energia do edifício.

Venezianas, persianas verticais e cortinas de rolo são exemplos destes dispositivos. Venezianas são amplamente utilizadas em prédios comerciais, em que permitem a regulação do ângulo de inclinação de seus componentes. Já as persianas instaladas na parte interna dos edifícios, são popularmente utilizados em prédios comerciais e residenciais, podendo ser ajustadas manualmente ou automaticamente. Por fim, as cortinas de rolos também apresentam aplicações em prédios comerciais e residenciais, podendo ser controladas manualmente ou automaticamente, porém, só permitem total abertura ou total fechamento de seu sistema, prejudicando o aproveitamento da luz natural. A figura 4 abaixo ilustra exemplos destes três tipos de sombreamento móvel [12].

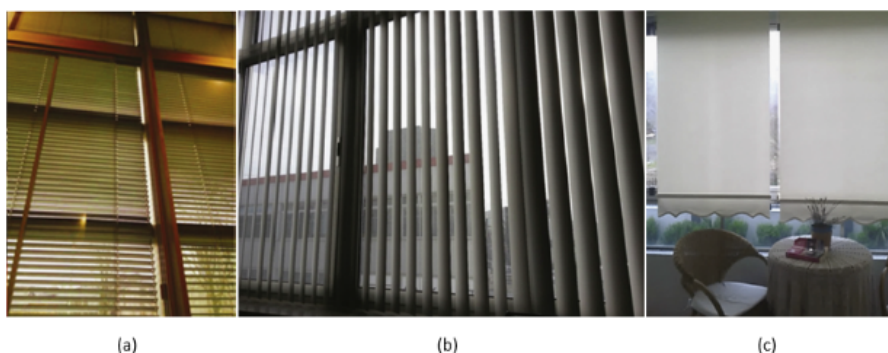


Figura 4 – Venezianas (a), persianas verticais (b) e cortinas de rolos (c) [12].

Por conta dos motivos citados anteriormente, os dispositivos móveis serão o foco deste trabalho, particularmente as de instalação interna, por conta de apresentarem uma manutenção mais fácil do que os externos e um custo de instalação mais acessível, caso o edifício já esteja construído. Dessa forma, serão apresentados alguns fatores importantes desse sistema.

4.1.1 Ângulo de inclinação

Huang, Niu e Chung [13] avaliaram o impacto do ângulo de inclinação das persianas na redução do ganho de calor do edifício e do consumo de energia elétrica para o sistema de iluminação, por meio de simulações computacionais de modelos de prédios localizados nas cidades de Singapura, Hong Kong, Miami e Houston. A figura 5 abaixo ilustra os ângulos de inclinação utilizados no experimento e, as figura 6 e 7, seus resultados.

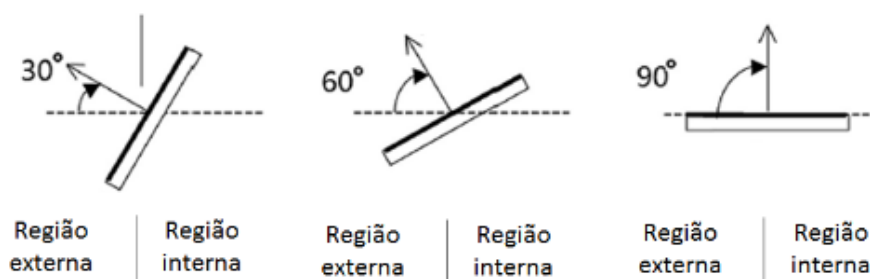


Figura 5 – Ângulos de inclinação utilizados [13].

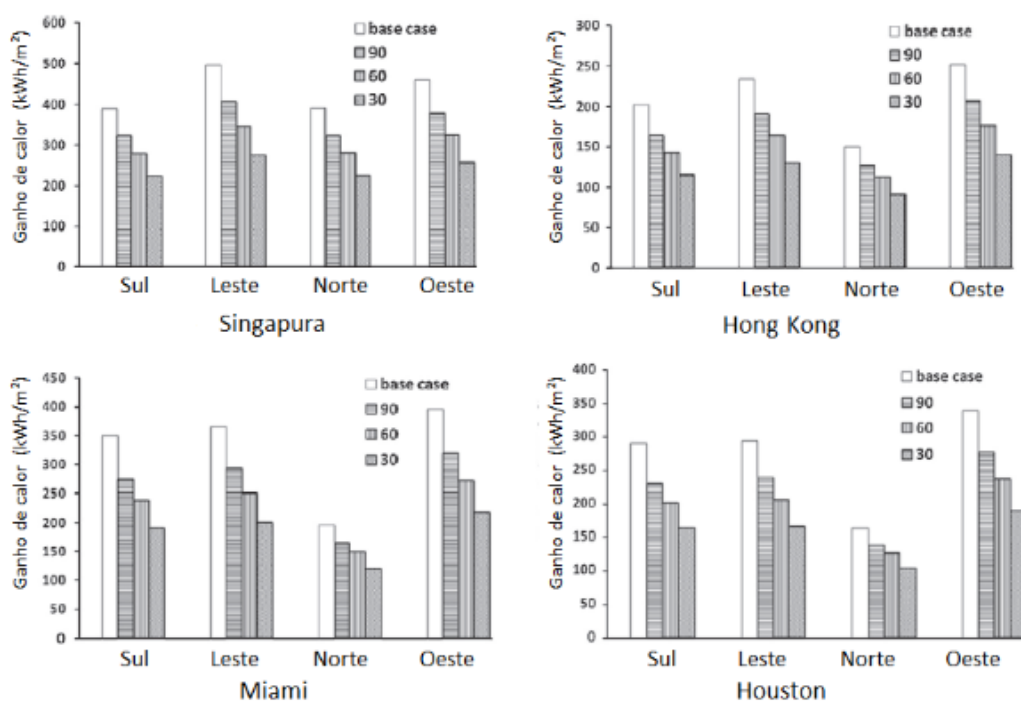


Figura 6 – Efeito do ângulo de inclinação para o ganho de calor em diferentes cidades [13].

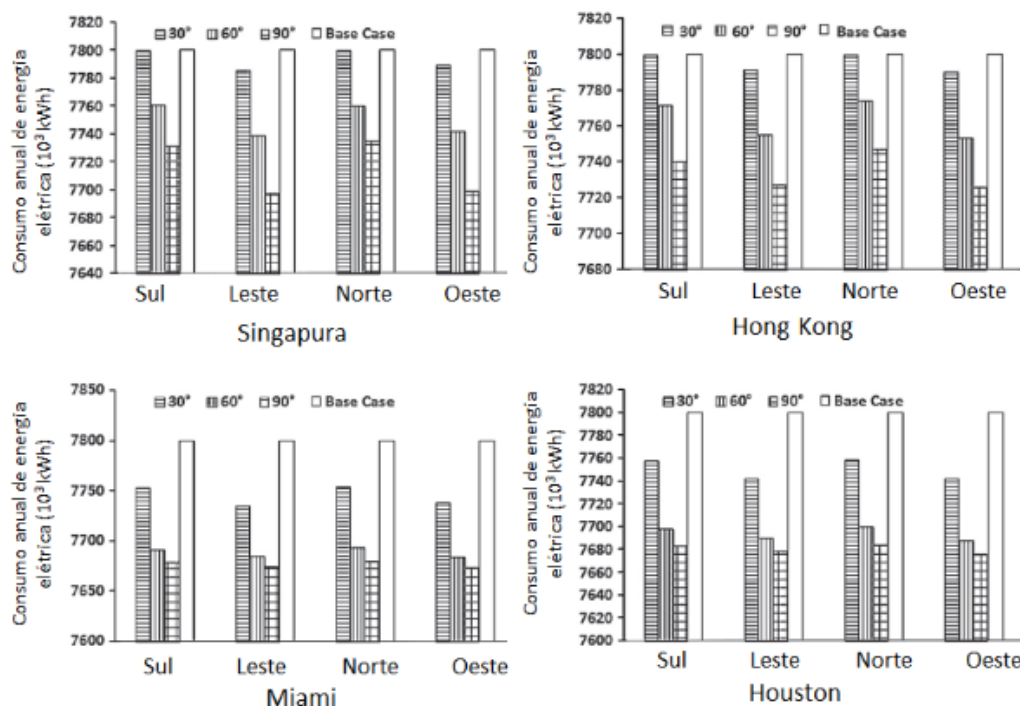


Figura 7 – Impacto do ângulo de inclinação no consumo de energia elétrica do sistema de iluminação para diferentes cidades [13].

Analisando os resultados obtidos na figura 6, verifica-se que o valor do ângulo de inclinação das persianas impacta diretamente na redução da carga térmica do edifício, independente da localização destes. Na maior parte dos casos, quando as persianas estão reguladas na posição de 90° (segunda coluna de todas as orientações), reduzem o ganho de calor em somente 15 a 20% em relação ao caso base (primeira coluna de todas as orientações), enquanto que na posição de 30° (última coluna de todas as orientações) reduzem cerca de 40 a 50% [13].

Em relação a figura 7, nota-se que conforme o ângulo de inclinação das persianas aumenta, diminui-se o consumo de energia elétrica para a iluminação artificial, pois há uma maior incidência de iluminação natural no ambiente. Ressalta-se que a redução no consumo de energia elétrica neste experimento foi pequena por conta do baixo coeficiente de forma do edifício, em que este é a razão entre a área externa e o volume desta construção.

Entretanto, pode-se alcançar valores maiores de redução do consumo de energia elétrica. Bodart e De Herde [14] desenvolveram um modelo para estimar o consumo de energia elétrica para o sistema de iluminação e, chegaram a conclusão que considerando apenas a disponibilidade de luz natural, esse consumo poderia ser reduzido entre 50 a

80%.

4.1.2 Controle

De acordo com Long e Ye [15], existem três grandes grupos de algoritmos de controle, dependendo do critério utilizado. O primeiro engloba controladores limiares, em que a movimentação das persianas é estimulada quando valores de luminosidade ou radiação solar ultrapassam um limite pré-definido. A segunda categoria possui o objetivo de bloquear a luz solar por meio de ajustes na posição do sistema de sombreamento, de acordo com a posição do Sol. Por fim, na última categoria são contidos sistemas que utilizam uma variedade de sensores e algoritmos de controle.

Além da definição do tipo de controle a ser utilizado, é importante definir seus parâmetros, como nível de luminosidade e temperatura do ambiente, nível máximo de ofuscamento permitido e definir como será a interface usuário-controlador.

Este último é um fator importante, pois segundo Konstantoglou e Tsiangassoulis [16], sistemas totalmente automatizados são geralmente menos aceitos pelos usuários e o grau de aceitação depende da simplicidade do sistema e se suas operações são intuitivas. Por meio de um estudo realizado por Reinhart e Voss [17], concluiu-se que 88% das correções realizadas pelos usuários em relação aos comandos do controlador, estavam ligadas a reabertura das persianas após o fechamento automático realizado pelo sistema de controle.

Dessa forma, nota-se a importância da seleção correta do sistema de controle a ser utilizado, com o intuito de satisfazer o usuário, sem prejudicar a função do sistema, ou seja, evitar que o comportamento e a preferência do usuário cause um maior consumo de energia elétrica no ambiente, por exemplo.

Por fim, segundo Long e Ye [16], persianas que possuem um sistema de controle adequado podem economizar até 20% da energia utilizada no sistema de refrigeração e até 50% da utilizada no sistema de iluminação, em comparação com sistemas estáticos.

4.2 Dimerização

A dimerização é uma estratégia que permite o controle da potência das lâmpadas utilizadas, de forma a economizar energia elétrica em momentos de alta luminosidade promovida pela luz solar. Pesquisas realizadas demonstram que a utilização deste sistema pode economizar até 70% da energia elétrica utilizada no sistema de iluminação [18-20]. Esta estratégia é geralmente utilizada em conjunto com o sistema de

sombreamento, com o objetivo de otimizar as duas estratégias.

Geralmente, o controle deste sistema é realizado com o objetivo de manter a intensidade luminosa no plano de trabalho a um valor pré-estabelecido. De acordo com o código para iluminação interior do CIBSE (*Chartered Institution of Building Services Engineers*), escritórios em geral devem possuir no mínimo 500 *lux* de intensidade luminosa no plano de trabalho [21]. Dessa forma, quando detecta-se que o ambiente apresenta menos de 500 *lux*, aciona-se o sistema de iluminação artificial, entretanto, quando este valor é ultrapassado, o sistema é desligado, com o intuito de economizar energia elétrica.

Um sistema de dimerização utilizado é o sistema sensível a luz do dia. Este sistema apresenta três principais componentes, o controlador de iluminação, os reatores eletrônicos de redução e os fotossensores. Primeiramente, os fotossensores detectam o nível de luminosidade no plano de trabalho avaliado, enviando um sinal para o controlador de iluminação, em que este determinam se será necessário aumentar ou diminuir a potência das lâmpadas. Por fim, os reatores realizam a ação determinada pelos controladores. Estes reatores podem variar entre 10% e 100% o valor da potência elétrica das lâmpadas. [22]

Normalmente, os fotossensores são instalados no teto dos ambientes e orientados para realizar medidas no plano de trabalho. A localização da instalação destes componentes são determinantes no correto funcionamento deste sistema. Em edifícios em construção, estes equipamentos são fáceis de serem instalados. Entretanto, em edifícios construídos, esta instalação não é trivial [23]. Por conta disso, estão sendo desenvolvidos métodos de controle de dimerização através de modelos de edifícios simulados em *softwares*, que não necessitam de sensores de luminosidade [24-26]. Dessa forma, com o intuito de poder monitorar o nível de iluminação incidente no ambiente, pode-se utilizar placas fotovoltaicas instaladas no edifício, no lugar de sensores de luminosidade [27].

Utilizando esta estratégia, Lee, Kim, Yang *et.al* [27] obtiveram resultados de economia de energia elétrica ao utilizar um sistema de dimerização que era ativado quando o nível de luminosidade era abaixo de 500 *lux* a 0,8 metros do chão. A figura 8 abaixo ilustra o resultado deste experimento.

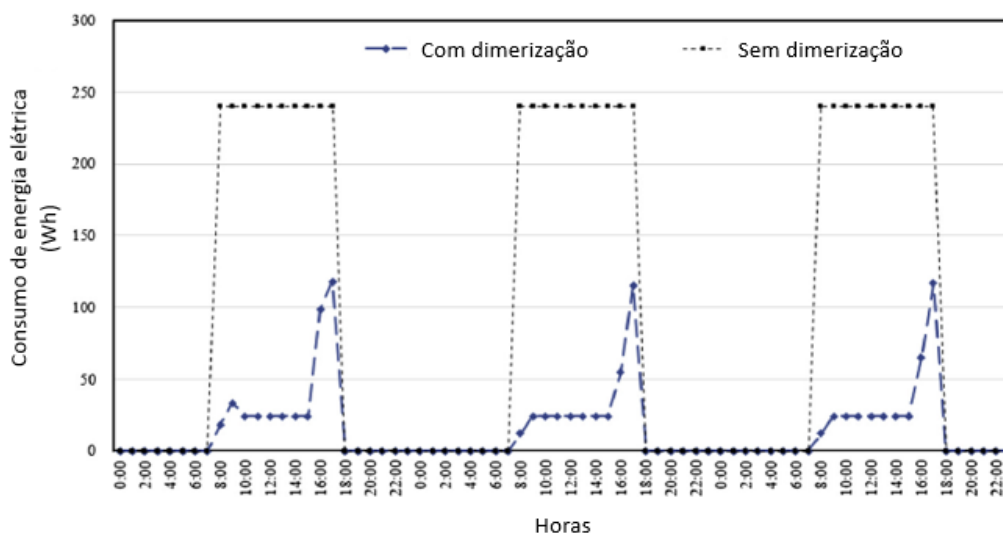


Figura 8 – Curvas de consumo de energia elétrica de sistemas com e sem dimerização [27].

Analisando a figura acima, nota-se uma ampla redução no consumo de energia elétrica, principalmente nas primeiras horas do dia, em que há maior incidência de luz solar no ambiente. Segundo os pesquisadores, houve uma redução de 83% no consumo de energia elétrica com a implantação do sistema de dimerização.

Entretanto, ressalta-se que estes valores foram obtidos com base em simulações, podendo sofrer variações quando aplicadas em um caso real. Má instalação dos equipamentos, utilização errada do sistema de controle por conta dos usuários e níveis de poeira sobre os painéis fotovoltaicos são exemplos de problemas que podem alterar os valores obtidos na simulação.

5 Parâmetros da edificação

Para a construção do edifício base, preocupou-se em caracterizar este modelo seguindo as normas ASHRAE 90.1 [2] e ABNT NBR 16401 [3]. Dentre os vários parâmetros utilizados, serão detalhados abaixo, somente os principais.

5.1 Geometria do edifício

De forma a representar um edifício típico da cidade de São Paulo, este foi segmentado em três categorias de andares, o térreo, o tipo e o ático. O modelo criado contém 20 andares, sendo composto por 1 térreo, andar no nível do solo; 18 tipo, andares intermediários; e 1 ático, andar mais alto da construção. Todos os andares possuem formato retangular de 30 metros de comprimento, 35 metros de largura e 3 metros de pé direito.

Além disso, a área envidraçada de cada face do edifício corresponde a 40% da área desta fachada, estando centralizadas em relação às arestas laterais e distante de 0,75 metros das arestas superiores e inferiores. Dessa forma, estas áreas envidraçadas possuem 24 metros de comprimento por 1,5 metros de altura em duas faces e, 28 metros de comprimento pela mesma altura que os demais, nos outros dois lados do edifício. A figura 9 ilustra este edifício base criado a partir do *software SketchUp*.

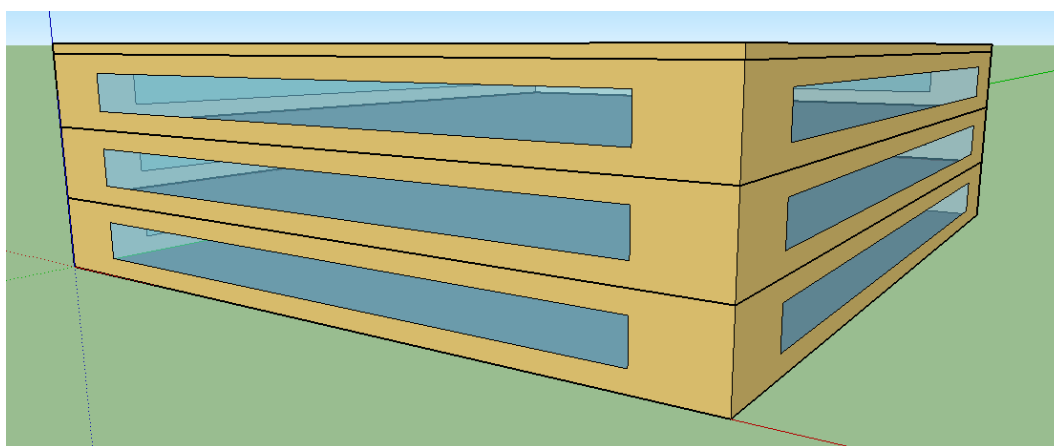


Figura 9 – Edifício base

5.2 Densidade ocupacional

De forma a estimar a quantidade de pessoas presentes em cada andar da edificação, consultou-se a norma ABNT NBR 16401 [3], que define a densidade de pessoas para cada 100 metros quadrados, como visto na tabela 2, abaixo.

Tabela 2 – Densidade ocupacional

<i>Local</i>	<i>Densidade (pessoas/100m²)</i>
Hall recepção	10
Escritório de diretoria	6
Escritório de baixa densidade	11
Escritório de média densidade	14
Escritório de alta densidade	20

Dados retirados da ABNT NBR 16401 [3]

Para a construção do modelo base, adotou-se uma densidade de 20 pessoas para cada 100 metros quadrados, ou seja, deseja-se simular um escritório de alta densidade.

5.3 Iluminação

Para a definição da potência elétrica instalada em cada andar, seguiu-se a norma ASHRAE 90.1 [2], em que por meio do método *Space-by-Space*, sugere-se que haja aproximadamente 12 W/m² para escritórios fechados.

Dessa forma, adotou-se esse valor para a caracterização do edifício base. Porém, posteriormente, com a adoção da dimerização, este valor será alterado, de forma a adequar aos níveis de iluminação requerido para o ambiente.

5.4 Equipamentos elétricos

De modo a definir a potência elétrica dissipada pelos equipamentos elétricos no ambiente, consultou-se a norma ABNT NBR 16401 [3]. Nela são definidas taxas de dissipação de calor de acordo com o tipo, modo de uso e a quantidade de equipamento utilizado. Entretanto, preferiu-se utilizar um valor médio de dissipação.

Dessa forma, com base na tabela 3, é possível verificar a densidade típica de carga de equipamentos para alguns modelos de escritórios.

Tabela 3 – Densidade típica de carga de equipamentos elétricos

<i>Tipo de carga</i>	<i>Densidade (W/m²)</i>	<i>Característica do escritório</i>
Leve	5,4	15,5 m ² por posto de trabalho
Média	10,7	11,6 m ² por posto de trabalho
Média/Alta	16,2	9,3 m ² por posto de trabalho
Alta	21,5	7,7 m ² por posto de trabalho

Dados retirados da ABNT NBR 16401 [3]

Para a simulação do ambiente base, optou-se pelo tipo de carga médio para os equipamentos, porém, realizou-se um ajuste no valor da densidade típica de carga dos equipamentos, utilizando um valor de 10 W/m².

5.5 Sistema de climatização

Para o sistema de climatização, utilizou-se um sistema VAV (Volume de ar variável), em que varia-se o fluxo de ar a temperatura constante. Dessa forma, de acordo com a leitura do termostato instalado em cada ambiente do edifício, este sistema permite, por meio de uma caixa VAV, regular a vazão de ar introduzida neste ambiente.

Com isso, este sistema permite um controle de resfriamento ou aquecimento independente para cada zona térmica do ambiente, uma redução no consumo de energia elétrica, uma manutenção mais precisa da temperatura definida e, por conta dos equipamentos serem compactos, podem ser instalados em cada andar, facilitando a mudança na disposição dos dutos e saídas de ar, caso haja alguma alteração do *layout* do ambiente.

Um componente importante deste sistema é o *chiller*, equipamento responsável pela produção de água gelada para o sistema, podendo resfriar o ar utilizado. Para o edifício base, escolheu-se um *chiller* elétrico alternativo resfriado a água e, consultando a norma ASHRAE 90.1 [2], definiu-se um COP (Coeficiente de Performance) de 4,2 para este equipamento.

6 Resultado da simulação do edifício base

Conforme mencionado anteriormente, para o levantamento das curvas de consumo do edifício base, utilizou-se o software *EnergyPlus*, programa desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos.

Dessa forma, por meio dos parâmetros da edificação descritos anteriormente e dos dados climáticos da cidade de São Paulo, simulou-se o funcionamento desta construção no período de um ano, em que os principais resultados serão mostrados logo abaixo.

Ressalta-se que será dado um maior enfoque no consumo de energia elétrica, de modo a comparar a participação do consumo dos sistemas de climatização, iluminação e dos equipamentos instalados, em relação ao consumo total deste edifício, podendo ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 – Consumo energético segmentado por sistemas

<i>Consumo Energético</i>	<i>Eletricidade [MWh]</i>	<i>Gás Natural [MWh]</i>	<i>Água [m³]</i>
Aquecimento	-	17,1	-
Refrigeração	1.099,0	-	-
Iluminação	815,3	-	-
Equipamentos	996,3	-	-
Ventilação	814,4	-	-
Bombeamento	224,1	-	-
Torres de Resfriamento	31,0	-	10.046,5
Total de utilização	3.980,1	17,1	10.046,5

De forma a poder verificar a participação de cada um desses sistemas em relação ao consumo total, construiu-se a matriz de consumo desagregado, conforme a figura 10 abaixo. Verifica-se que o sistema de climatização, composto por refrigeração, ventilação, bombeamento e torres de refrigeração é o sistema que apresenta maior demanda por energia elétrica no edifício, representando cerca de 52,5% do consumo total. Já o restante do consumo é distribuído entre os equipamentos instalados (25%) e o sistema de iluminação (20,5%).

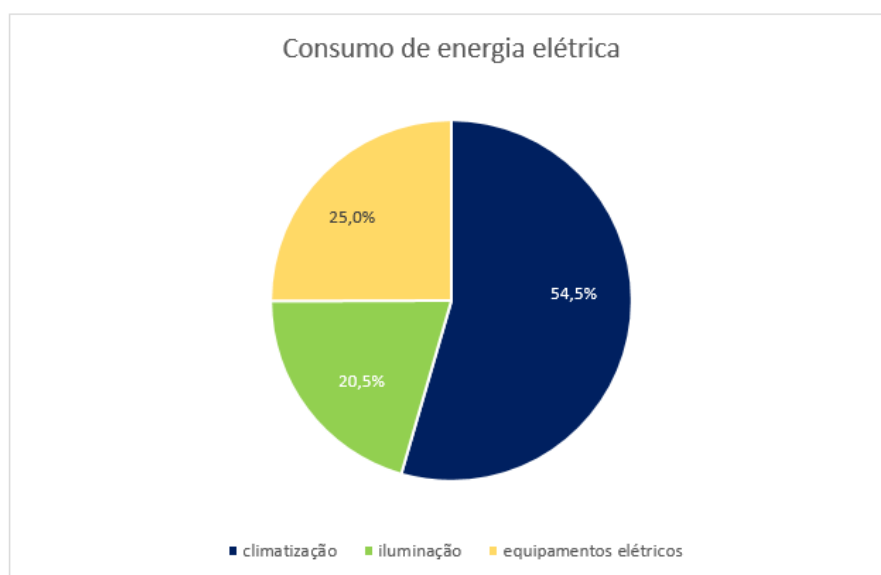


Figura 10 – Matriz de consumo desagregado da edificação base

Por conta do sistema de climatização apresentar uma grande relevância no consumo de energia elétrica, a figura 11 ilustra a matriz de consumo desagregado do sistema de climatização. A partir dessa figura será possível comparar como as estratégias de redução do consumo de energia elétrica, que serão posteriormente adotadas, irão afetar a participação desses subsistemas, em especial o de refrigeração, que possui uma participação relevante.

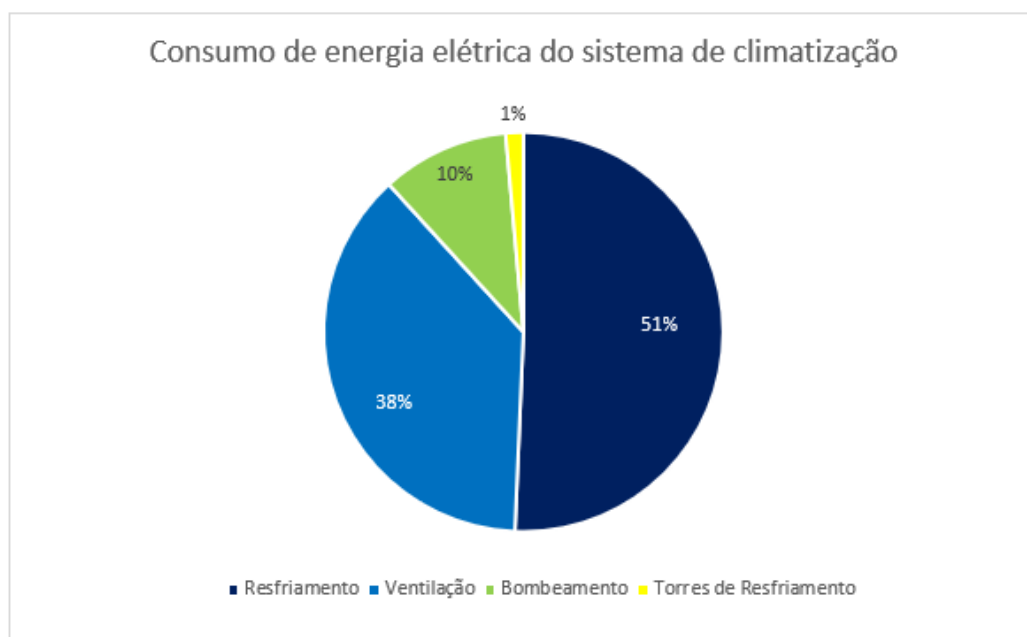


Figura 11 – Matriz de consumo desagregado do sistema de climatização

Posteriormente, realizou-se um levantamento das curvas de consumo dos sistemas estudados para cada um dos meses do ano. As figuras 12, 13 e 14 ilustram o comportamento do consumo elétrico de cada sistema.

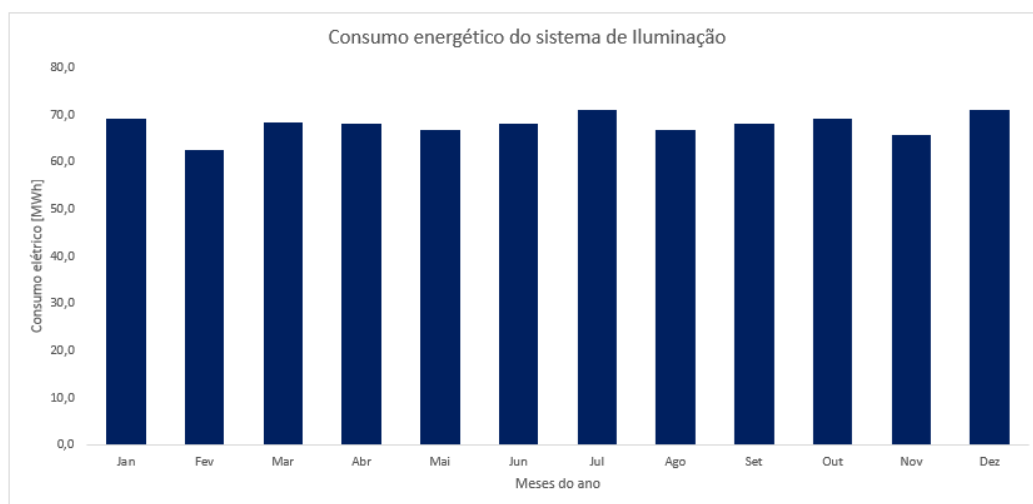


Figura 12 – Consumo energético do sistema de iluminação

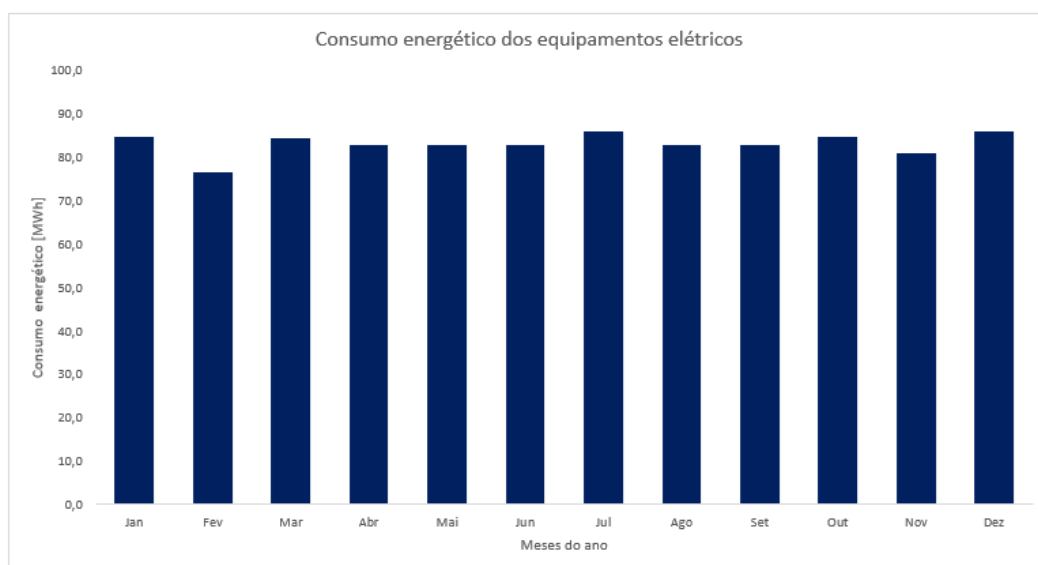


Figura 13 – Consumo energético dos equipamentos instalados

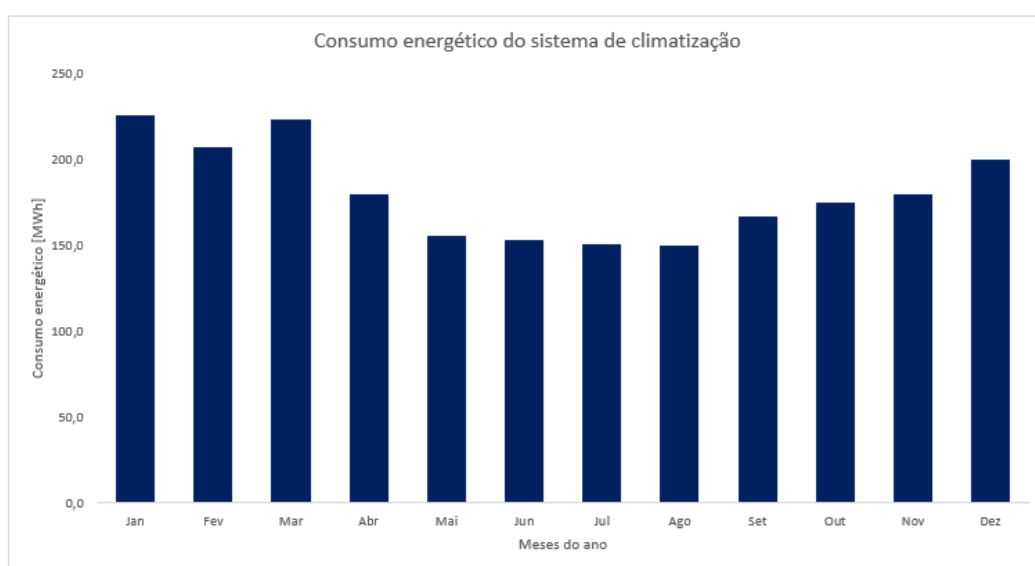


Figura 14 – Consumo energético do sistema de climatização

Analisando as figuras acima, verifica-se que o consumo de energia elétrica não apresenta variação significativa durante o ano para o sistema de iluminação e para os equipamentos instalados, porém, há uma grande variação para o sistema de climatização.

A partir da figura 14, nota-se que nos meses de maio a agosto há uma significativa redução no consumo médio de energia elétrica quando comparados com os meses de verão. Esta redução no consumo médio de eletricidade é de aproximadamente 41%.

Isto está relacionado a uma menor necessidade do sistema de refrigeração, maior responsável pelo consumo de energia do sistema de climatização, por conta das temperaturas mais amenas da cidade de São Paulo nos meses de inverno.

7 Edifício com dimerização

Após a etapa de construção do modelo base e o levantamento de suas curvas de consumo de energia elétrica, desenvolveu-se a partir do modelo base, um modelo de edifício em que se incluiu o sistema de dimerização. O sistema de dimerização utilizado possibilita que o sistema de iluminação artificial funcione desde totalmente desligado, até a potência máxima (iluminação máxima). A determinação da porcentagem da potência máxima que o sistema atuará é definido pelo nível de luminosidade detectado pelos sensores do edifício. Ressalta-se que o *setpoint* para ativação do sistema de dimerização é de 500 *lux*. Abaixo, será apresentado maiores detalhes referentes a esse modelo.

7.1 Disposição dos sensores

Para iniciar o processo de análise e escolha do sistema de dimerização a ser implantado, deve-se estudar primeiramente, a disposição dos sensores, pois estes serão responsáveis por obter informações de luminosidade no ambiente.

De forma a estudar a luminosidade em um plano de trabalho (0,75m do chão), colocou-se dois sensores para cada andar do edifício, neste plano de trabalho definido, em que cada um controla 50% da luminosidade do ambiente. Com o objetivo de definir qual o melhor posicionamento destes sensores, realizou-se duas análises. A Figura 15 abaixo ilustra o posicionamento dos sensores para o cenário 1 (a) e o cenário 2 (b).

Além disso, para cada cenário, analisou-se o nível de iluminação do ambiente em três horários (8h, 12h e 15h) para um dia típico de verão (21 de janeiro) e um dia típico de inverno (21 de julho). Nota-se que no período da manhã (8h), a fachada leste do edifício apresenta maior luminosidade, visto que é a região que apresenta maior incidência de radiação solar. Com o decorrer do dia, este comportamento altera-se, visto que no período da tarde (15h), a fachada oeste apresenta maior luminosidade.

Por fim, levantou-se as curvas de consumo anual de energia elétrica para cada um dos sistemas analisados anteriormente (iluminação, equipamentos elétricos, climatização).

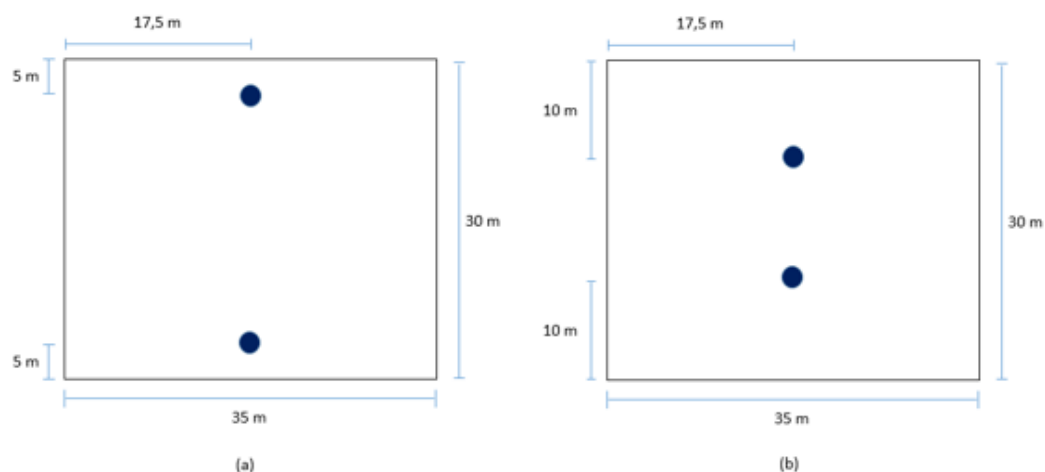


Figura 15 – Posicionamento dos sensores para os cenários 1 (a) e 2 (b)

7.1.1 Cenário 1

As figuras 16, 17 e 18, ilustram a luminosidade (eixo vertical) em relação as coordenadas (x e y) do local, para as 8 horas da manhã, meio dia e 17 horas da tarde, respectivamente, para o mês de janeiro.

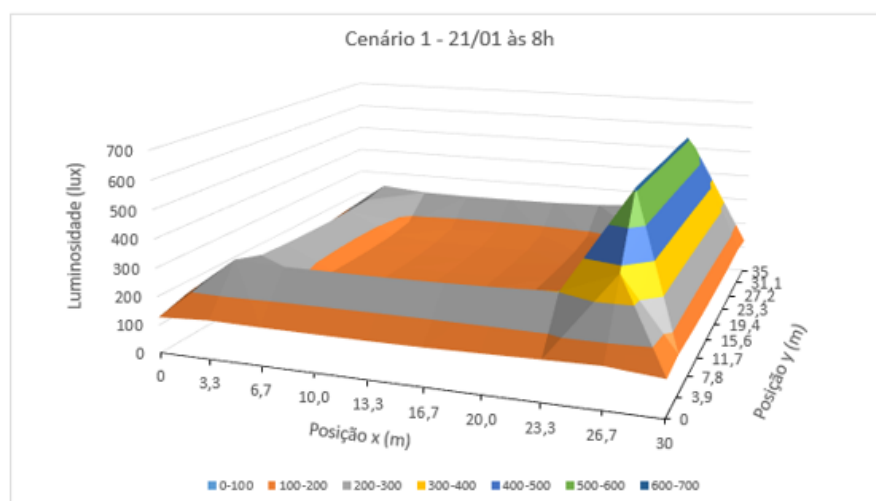


Figura 16 – Luminosidade do cenário 1 (21/01 – 8h)

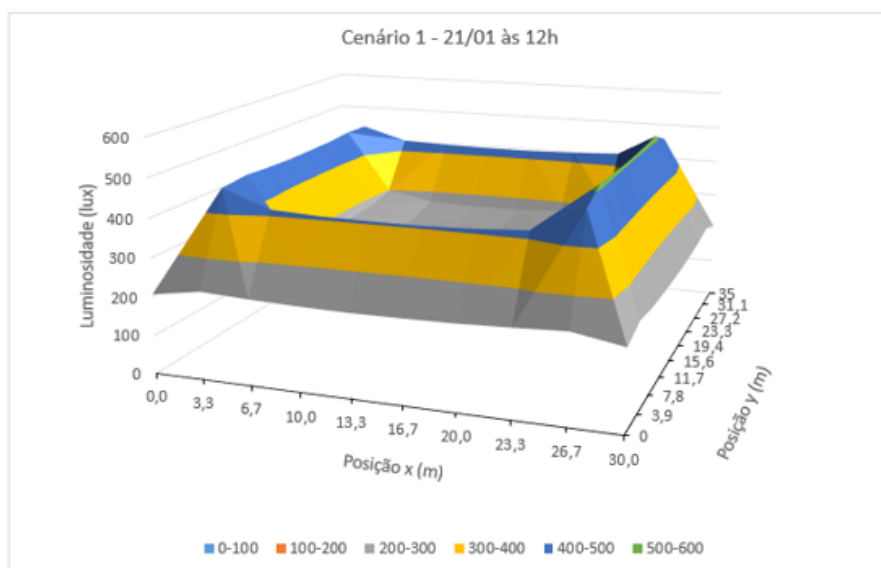


Figura 17 – Luminosidade do cenário 1 (21/01 – 12h)

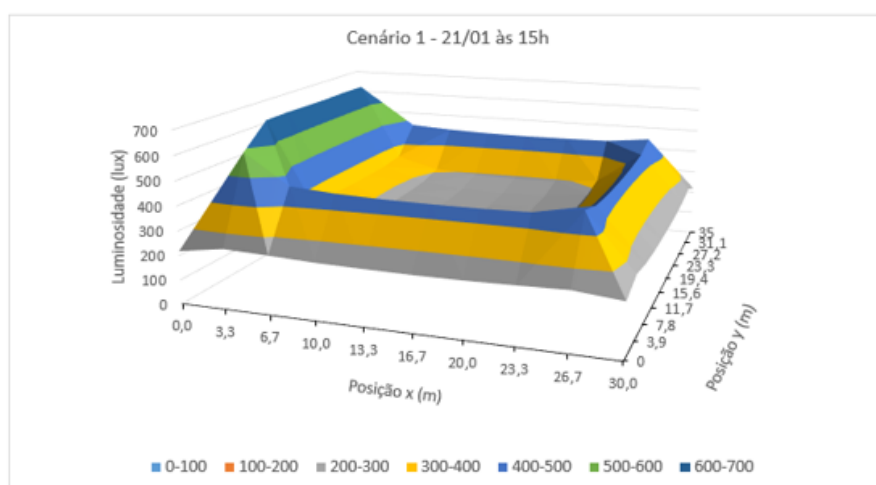


Figura 18 – Luminosidade do cenário 1 (21/01 – 15h)

Em seguida, as figuras 19, 20 e 21, ilustram as mesmas informações, porém, para o mês de junho, conforme verifica-se abaixo.

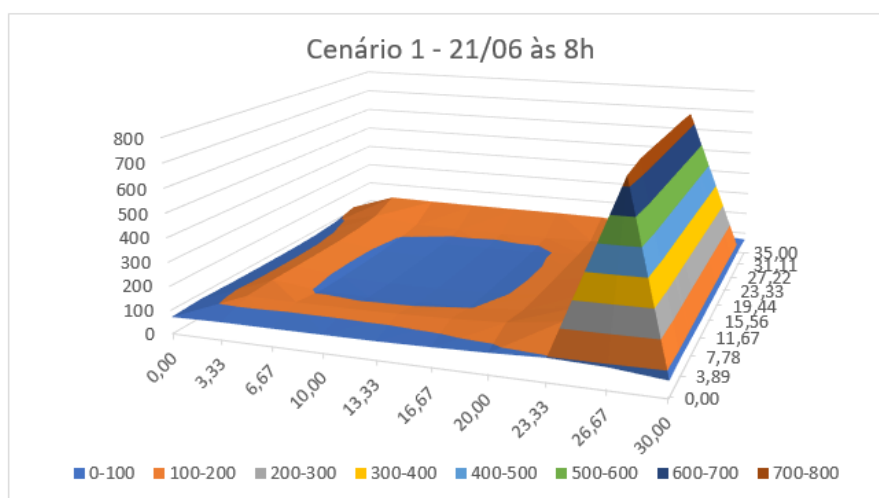


Figura 19 – Luminosidade do cenário 1 (21/06 – 8h)

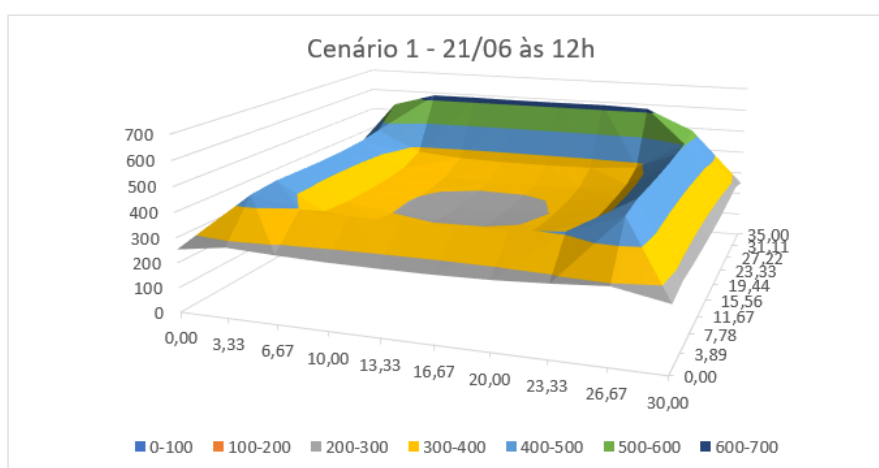


Figura 20 – Luminosidade do cenário 1 (21/06 – 12h)

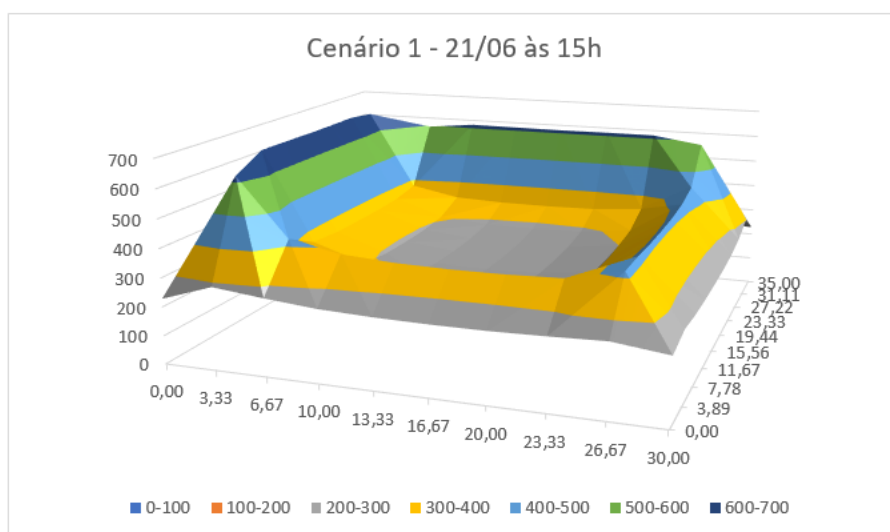


Figura 21 – Luminosidade do cenário 1 (21/06 – 15h)

A partir do posicionamento dos sensores proposto neste cenário, é possível realizar uma comparação entre a redução do consumo de energia elétrica, por sistemas, em relação ao caso base. Na figura 22 abaixo, é possível comparar o consumo de energia elétrica do caso base (azul) com a adoção do sistema de dimerização no cenário 1 (verde).

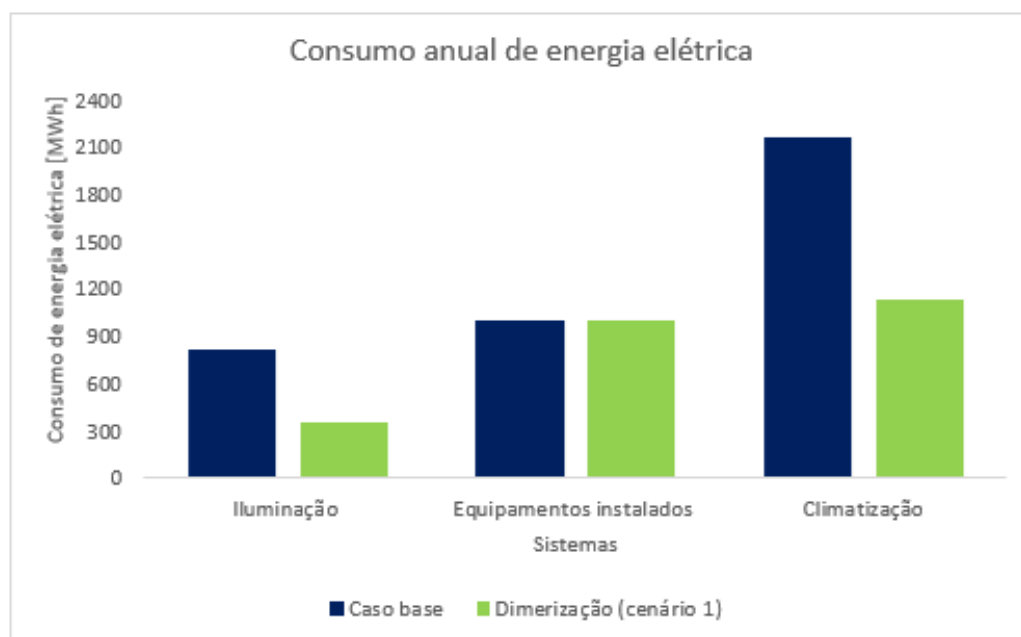


Figura 22 – Comparação do consumo anual de energia elétrica dos sistemas analisados

Com base na figura acima, nota-se que houve uma significativa redução no consumo de energia para o sistema de iluminação (56,8%), não houveram impactos nos equipamentos elétricos e, houve uma economia de energia para o sistema de climatização (48,0%), em que estão inclusos os sistemas de refrigeração, bombeamento, ventilação e torres de resfriamento. Com isso, nota-se uma redução de 37,7% no consumo anual de energia.

7.1.2 Cenário 2

As figuras 23, 24 e 25, ilustram a luminosidade (eixo vertical) em relação as coordenadas (x e y) do local, para as 8 horas da manhã, meio dia e 17 horas da tarde, respectivamente, para o mês de janeiro.

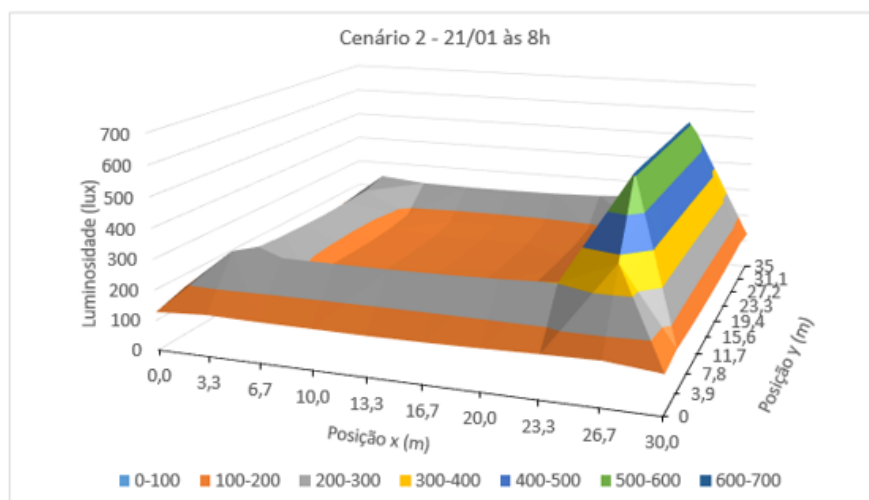


Figura 23 – Luminosidade do cenário 2 (21/01 – 8h)

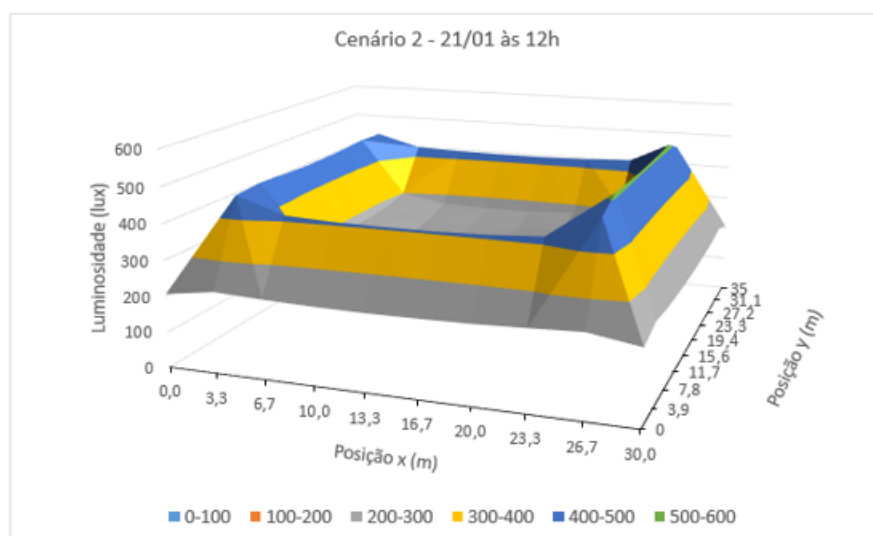


Figura 24 – Luminosidade do cenário 2 (21/01 – 12h)

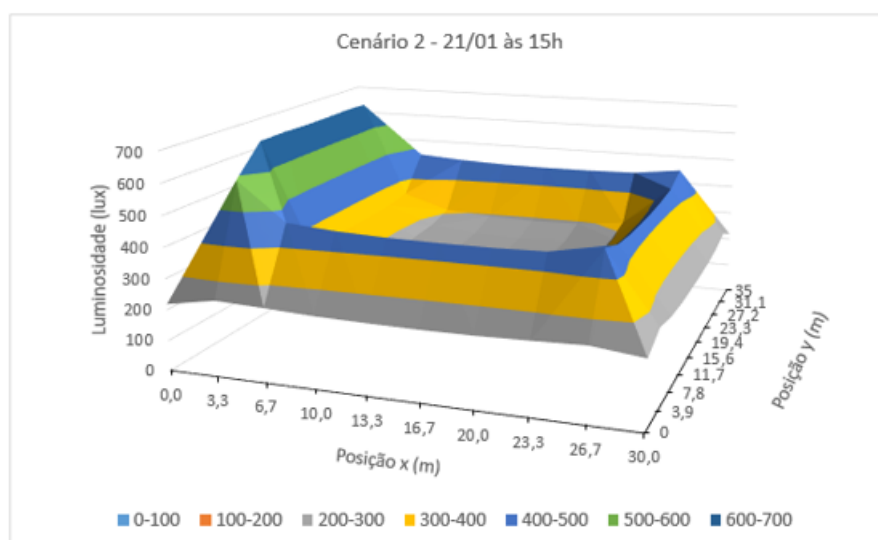


Figura 25 – Luminosidade do cenário 2 (21/01 – 15h)

Em seguida, as figuras 26, 27 e 28, ilustram as mesmas informações, porém, para o mês de junho, conforme verifica-se abaixo.

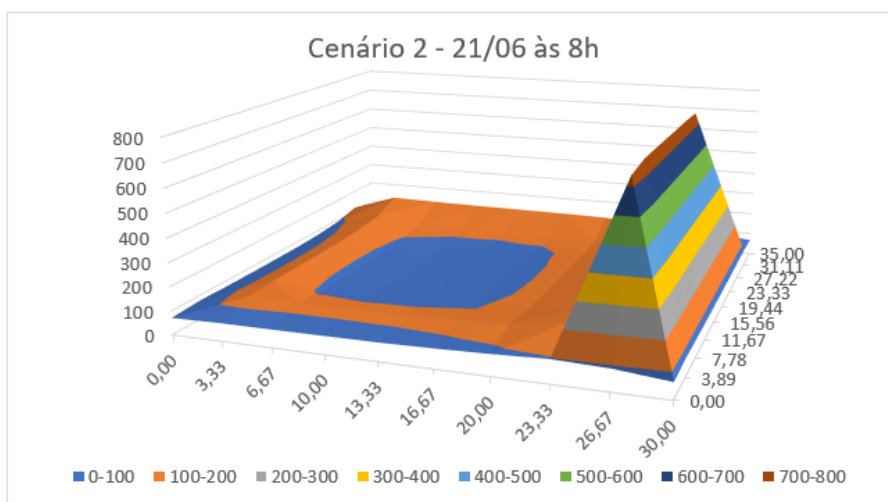


Figura 26 – Luminosidade do cenário 2 (21/06 – 8h)

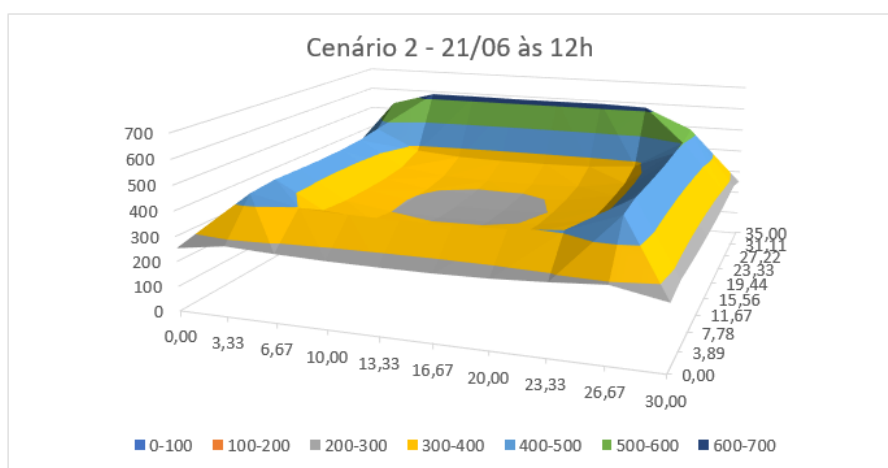


Figura 27 – Luminosidade do cenário 2 (21/06 – 12h)

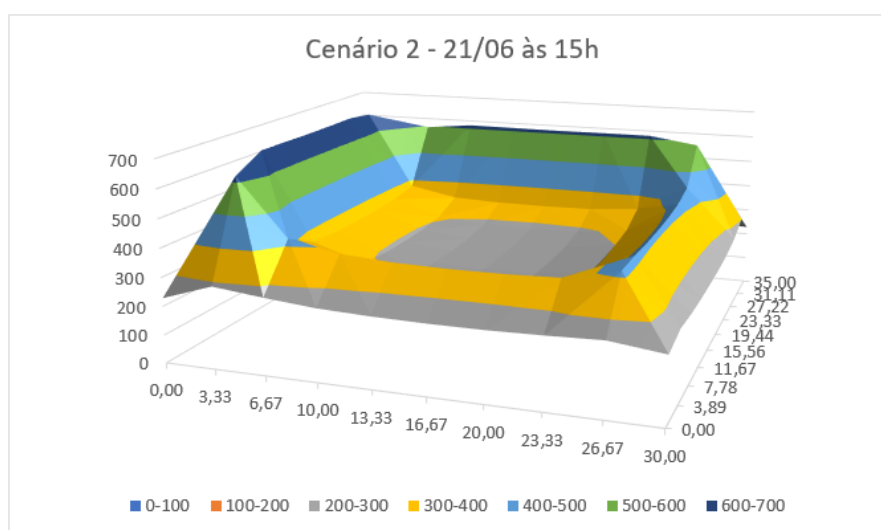


Figura 28 – Luminosidade do cenário 2 (21/06 – 15h)

A partir do posicionamento dos sensores proposto neste cenário, é possível realizar uma comparação entre a redução do consumo de energia elétrica, por sistemas, em relação ao caso base. Na figura 29 abaixo, é possível comparar o consumo de energia elétrica do caso base (azul) com a adoção do sistema de dimerização no cenário 2 (verde).

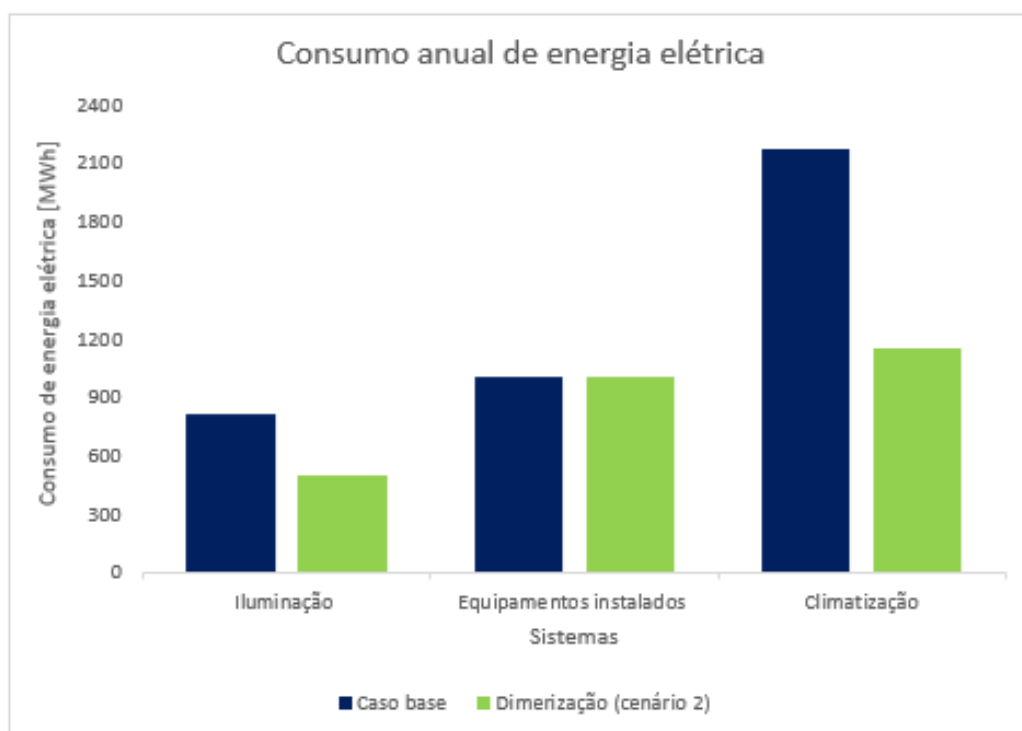


Figura 29 – Comparação do consumo anual de energia elétrica dos sistemas analisados

Com base na figura acima, nota-se que houve uma significativa redução no consumo de energia para o sistema de iluminação (39,2%), não houveram impactos nos equipamentos elétricos e, houve uma economia de energia para o sistema de climatização (47,2%), em que estão inclusos os sistemas de refrigeração, bombeamento, ventilação e torres de resfriamento. Com isso, nota-se uma redução de 33,8% no consumo anual de energia.

Por meio das análises realizadas, nota-se que o posicionamento dos sensores interfere no resultado de economia de energia elétrica do edifício. Por conta destes sensores estarem mais afastados das janelas, no cenário 2, em comparação com o cenário 1, estes captam menores valores de luminosidade do ambiente. Desta forma, o sistema de dimerização não é acionado em algumas situações, visto que o *setpoint* de acionamento deste sistema é de 500 *lux*. Portanto, deve-se seleccionar o posicionamento dos sensores, de forma a tornar o modelo mais próximo do caso real.

8 Edifício com sombreamento

Após a análise de comportamento do edifício com a estratégia de dimerização, estudou-se o impacto do sistema de sombreamento interno no consumo de energia elétrica. Entretanto, por simplicidade, utilizou-se um modelo de edifício simplificado, contendo apenas um andar e o plenum, com as mesmas medidas e características do edifício estudado anteriormente.

Assim, utilizando o parâmetro de "*shading control*" do *software EnergyPlus*, realizou-se simulações de *setpoint* de atuação do sistema de sombreamento, com o intuito de analisar qual o impacto desta estratégia, em relação ao consumo de energia elétrica do edifício.

Realizou-se simulações para as cidades de São Paulo, Porto Alegre e Natal e, os resultados de consumo de energia total do edifício estão nas tabelas abaixo.

Tabela 5 – Atuação do Sistema de Sombreamento (São Paulo)

SP							
Set Point (W/m ²)	200	100	50	20	0	Always On	Always Off
Total (kWh)	297.001	296.078	295.427	295.377	295.372	295.829	304.997
% Redução (Ref. Off)	-2,6%	-2,9%	-3,1%	-3,2%	-3,2%	-3,0%	-

Tabela 6 – Atuação do Sistema de Sombreamento (Porto Alegre)

POA							
Set Point (W/m ²)	200	100	50	20	0	Always On	Always Off
Total (kWh)	294.091	292.913	292.449	292.399	292.410	292.768	301.681
% Redução (Ref. Off)	-2,5%	-2,9%	-3,1%	-3,1%	-3,1%	-3,0%	-

Tabela 7 – Atuação do Sistema de Sombreamento (Natal)

NATAL							
Set Point (W/m ²)	200	100	50	20	0	Always On	Always Off
Total (kWh)	381.740	379.727	379.293	379.238	379.229	379.639	388.156
% Redução (Ref. Off)	-1,7%	-2,2%	-2,3%	-2,3%	-2,3%	-2,2%	-

Para as 3 cidades, foram simuladas 3 condições de controle de sombreamento. Uma "*Always On*", ou seja, sistema de sombreamento sempre ligado, "*Always Off*",

sistema de sombreamento sempre desligado e por fim, "*OnIfHighSolarOnWindow*", em que o sistema de sombreamento é ativado quando o nível de radiação solar difusa incidente sobre a janela excede o *setpoint* definido. Para esta última condição, foram realizados simulações para 0, 20, 50, 100 e 200 W/m^2 .

Além disso, analisou-se a redução no consumo de energia elétrica para cada condição de controle de sombreamento, em relação ao caso "*Always Off*". Para a cidade de São Paulo, a maior diferença percentual foi de 3,2%, enquanto que para Porto Alegre foi de 3,1% e, por fim, para Natal foi de 2,3%. Entretanto, esperava-se uma redução percentual maior no consumo de energia elétrica para todos os testes, principalmente para Natal, cidade onde há um nível de radiação solar superior à São Paulo e Porto Alegre.

9 Edifício com sombreamento e dimerização

Após análises dos efeitos de cada estratégia no consumo de energia elétrica, realizou-se uma análise em que o edifício contava com os efeitos das duas estratégias ao mesmo tempo. Para isto, utilizou-se a construção utilizada na análise do efeito de dimerização, acrescentando o controle de sombreamento. Da mesma forma realizada anteriormente para dimerização, serão analisados dois cenários, um em que os sensores de dimerização encontram-se mais próximos aos vidros e outro, em que se encontram próximos à região central do edifício.

Para o cenário 1, ao contrário do esperado, o consumo de energia elétrica anual do edifício foi de aproximadamente 4046 MWh, representando um acréscimo de 63% em relação ao caso com dimerização (cenário 1) e, cerca de 2% em relação ao caso base. A figura 30 ilustra o comportamento de consumo de energia elétrica segregado pelos sistemas analisados em relação ao caso com dimerização.

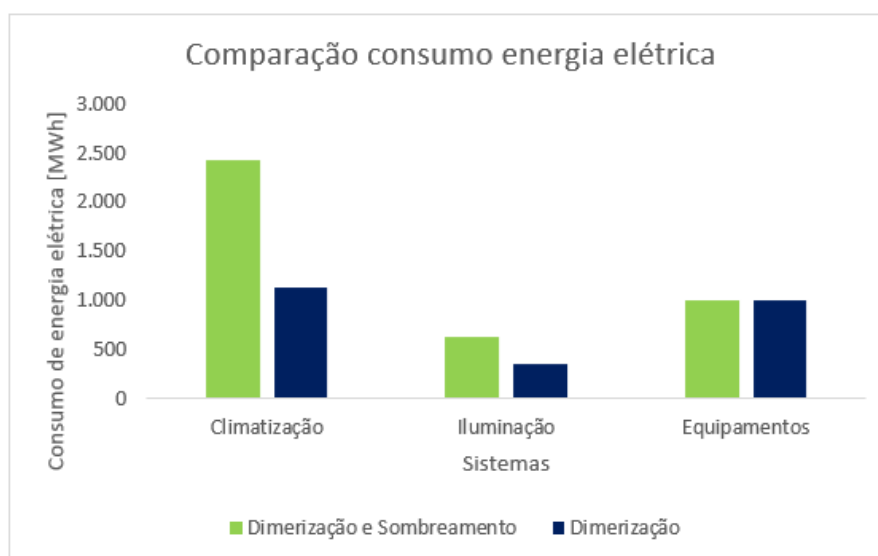


Figura 30 – Comparação de consumo de energia elétrica de edifício estudado (C1) em relação ao edifício com dimerização

Com base nos dados acima, nota-se que houve um significativo acréscimo no consumo de energia nos sistemas de climatização (115%) e de iluminação (76%) em relação ao caso com dimerização (cenário 1). Isto pode ser explicado pelo fato do controle

de sombreamento estar impedindo a entrada de iluminação natural, fazendo com que o ambiente tenha que ser iluminado artificialmente, aumentando o consumo de energia elétrica diretamente. Além disso, reflete-se no aumento de carga térmica do ambiente, demandando mais do sistema de climatização e, conseqüentemente, acrescentando o consumo de energia elétrica.

Ressalta-se que realizou-se simulações para diferentes *setpoints* de controle de sombreamento. Entretanto, não houve alteração significativa nos resultados apresentados.

Seguindo o mesmo raciocínio, realizou-se uma análise para o cenário 2. Neste, o consumo de energia elétrica anual do edifício foi de aproximadamente 4111 MWh, representando um acréscimo de 56% em relação ao caso com dimerização e, cerca de 3% em relação ao caso base. A figura 31 ilustra o comportamento de consumo de energia elétrica segregado pelos sistemas analisados em relação ao caso com dimerização.

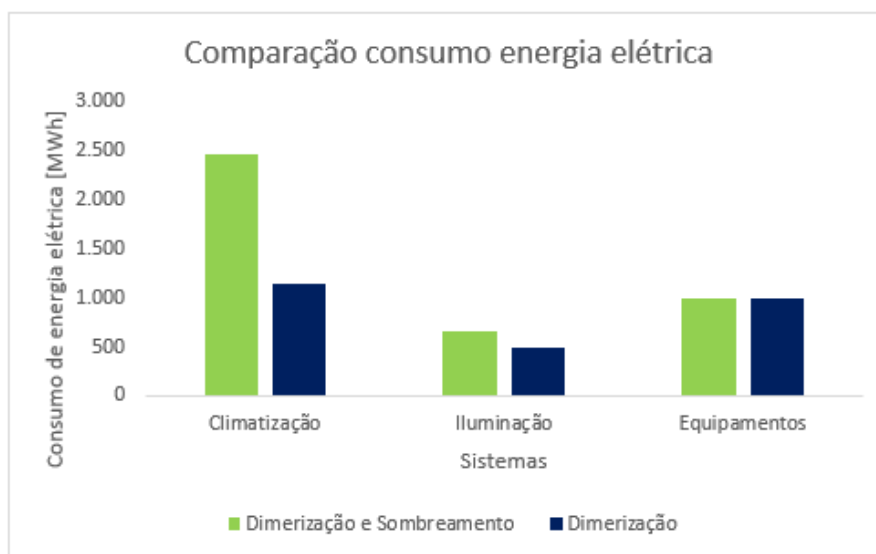


Figura 31 – Comparação de consumo de energia elétrica de edifício estudado (C2) em relação ao edifício com dimerização

A partir dos dados acima, nota-se que houve um aumento no consumo de energia nos sistemas de climatização (115%) e de iluminação (32%) em relação ao caso com dimerização (cenário 2). Estes resultados podem ser explicados da mesma forma que o explicitado anteriormente. Entretanto, vale ressaltar que a variação no consumo de energia elétrica para o sistema de iluminação é menor em relação ao cenário 1.

Este acréscimo inferior deve-se ao fato dos sensores estarem localizados em uma zona mais central do edifício, onde a influência do controle de sombreamento

é menor e, conseqüentemente, o impacto no consumo de energia elétrica também é reduzido.

Da mesma forma que anteriormente, as variações nos *setpoints* de controle de sombreamento não causaram impactos nos resultados apresentados.

10 Análise detalhada da operação de sistema de dimerização

Por conta de melhores resultados em economia energética quando utilizado a estratégia de dimerização em relação a de sombreamento interno, construiu-se novas configurações de edifícios, a fim de explorar as variações no consumo de energia elétrica frente aos diferentes posicionamentos dos sensores de iluminação. Com isso, construiu-se quatro edifícios.

Com estas novas configurações, comparou-se o comportamento do consumo energético destes edifícios em relação aos cenários 1 e 2 de dimerização, construídos anteriormente, em que os resultados são apresentados a seguir. Ressalta-se que para estes novos modelos, utilizou-se as mesmas caracterizações dos edifícios construídos anteriormente, ou seja, mesmos parâmetros de densidade ocupacional, iluminação, equipamentos elétricos e sistema de climatização.

10.1 Edifício esbelto

Uma das construções realizadas é um edifício mais esbelto em relação ao edifício base, possuindo andares de dimensões de 20x40x3m e dois sensores de iluminação por andar, conforme apresentado na figura 32.

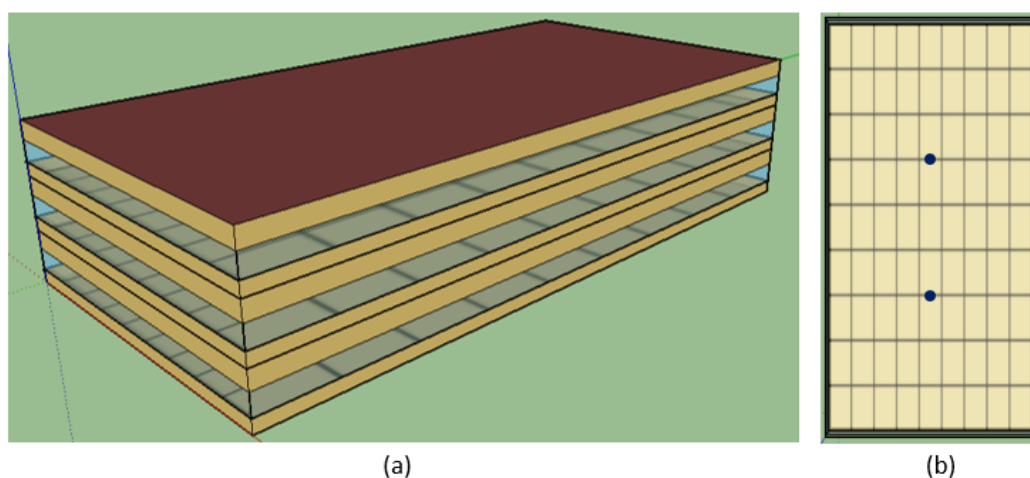


Figura 32 – Modelo do Edifício esbelto (a) e posicionamento dos sensores de iluminação (b)

10.2 Edifício perimetral

Construiu-se três edifícios que possuem segmentações nos andares, de forma a criar cinco zonas términas (quatro perimetrais e uma central), possibilitando o posicionamento de dois sensores de iluminação por zona, otimizando o controle de iluminação dos ambientes. Estas construções possuem andares de dimensões 30x35x3m, variando entre eles, a largura da zona perimetral (3, 4 e 5 metros de largura). A figura 33 ilustra o modelo do edifício perimetral de 3m de largura e o posicionamento dos sensores de iluminação.

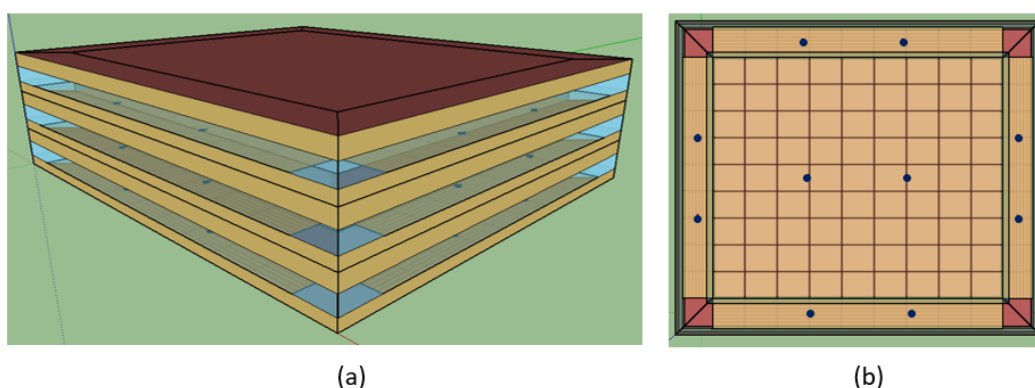


Figura 33 – Modelo do Edifício perimetral 3m (a) e posicionamento dos sensores de iluminação (b)

10.3 Estudo de iluminação no ambiente

Da mesma forma realizada anteriormente para os cenários 1 e 2 de dimerização, itens 7.1.1 e 7.1.2, respectivamente, realizou-se um estudo de iluminação no ambiente para o andar tipo do edifício esbelto e do edifício perimetral de 5m, sendo os resultados apresentados abaixo.

10.3.1 Edifício esbelto

As figuras 34, 35 e 36, ilustram a luminosidade (eixo vertical) em relação as coordenadas (x e y) do ambiente, para as 8 horas da manhã, meio dia e 17 horas da tarde, respectivamente, para o mês de janeiro.

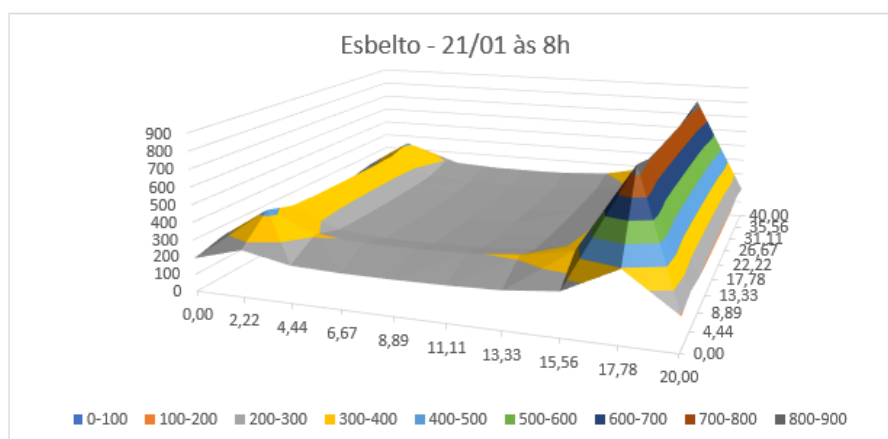


Figura 34 – Luminosidade do edifício esbelto (21/01 – 08h)

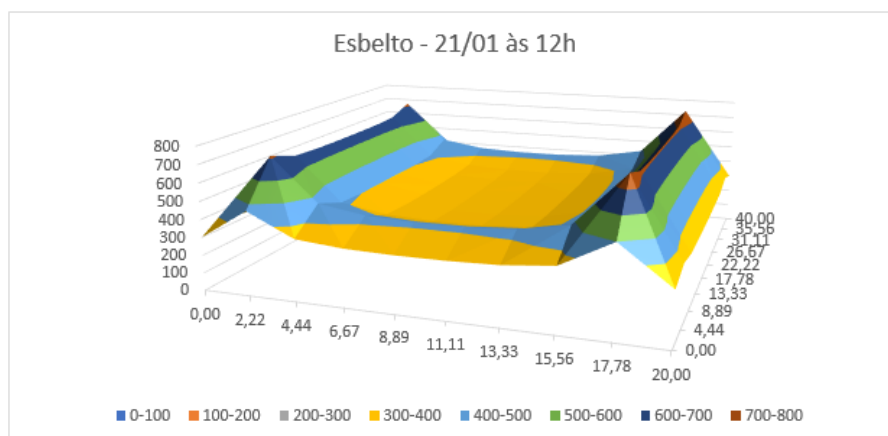


Figura 35 – Luminosidade do edifício esbelto (21/01 – 12h)

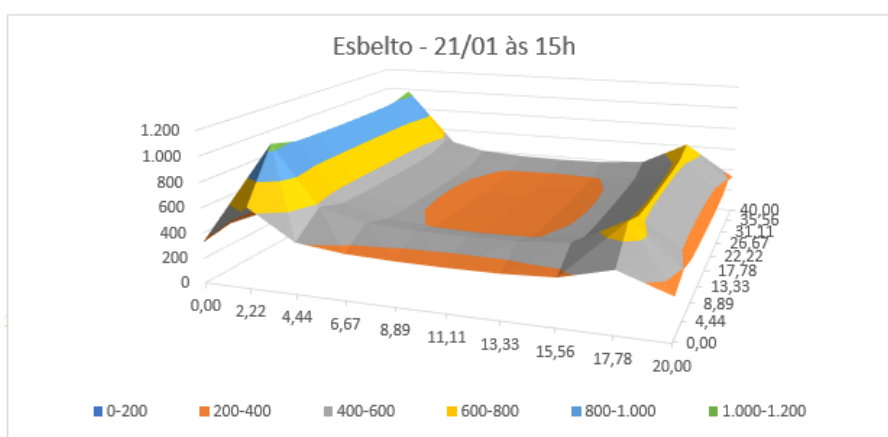


Figura 36 – Luminosidade do edifício esbelto (21/01 – 15h)

As figuras 37, 38 e 39, ilustram a luminosidade (eixo vertical) em relação as coordenadas (x e y) do ambiente, para as 8 horas da manhã, meio dia e 17 horas da tarde, respectivamente, para o mês de junho.

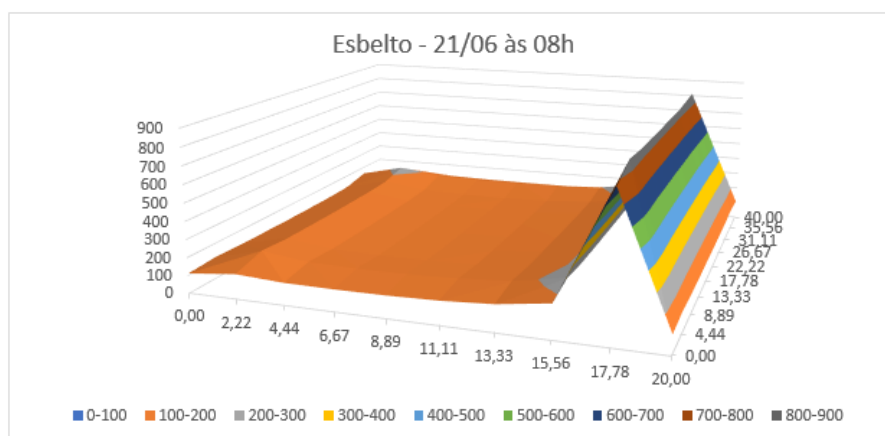


Figura 37 – Luminosidade do edifício esbelto (21/06 – 08h)

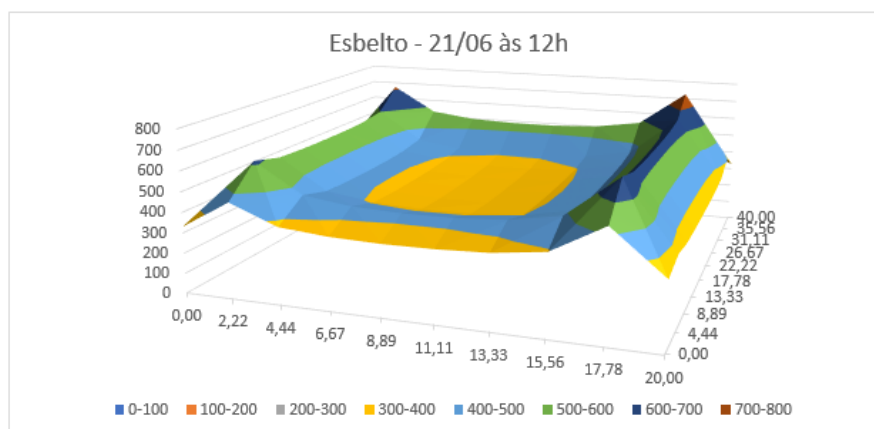


Figura 38 – Luminosidade do edifício esbelto (21/06 – 12h)

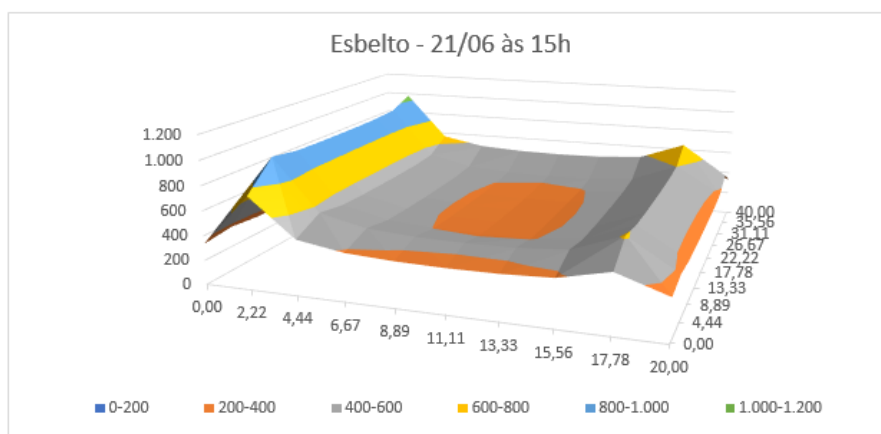


Figura 39 – Luminosidade do edifício esbelto (21/06 – 15h)

10.3.2 Edifício perimetral 5m

As figuras 40, 41 e 42, ilustram a luminosidade (eixo vertical) em relação as coordenadas (x e y) do ambiente, para as 8 horas da manhã, meio dia e 17 horas da tarde, respectivamente, para o mês de janeiro.

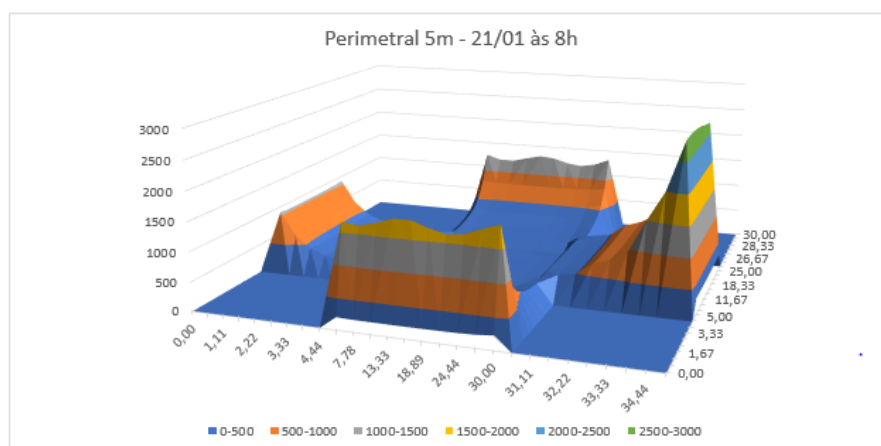


Figura 40 – Luminosidade do edifício perimetral 5m (21/01 – 08h)

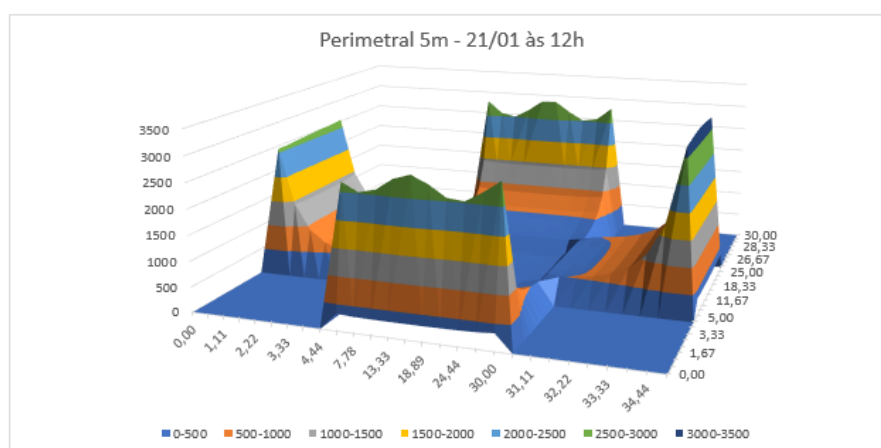


Figura 41 – Luminosidade do edifício perimetral 5m (21/01 – 12h)

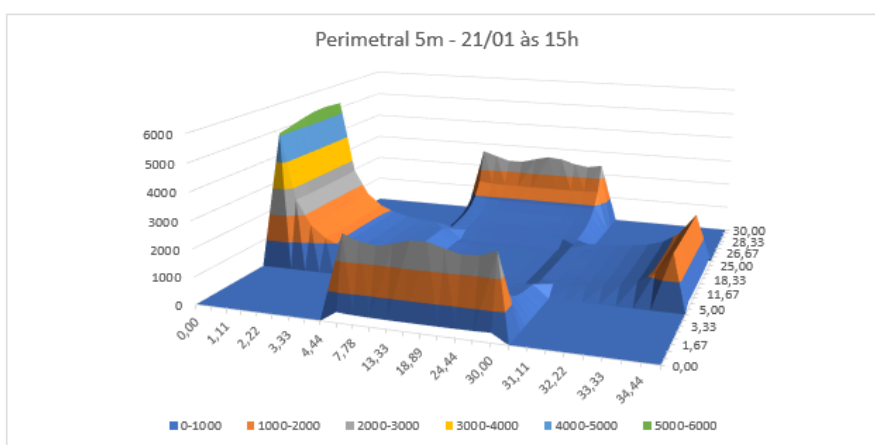


Figura 42 – Luminosidade do edifício perimetral 5m (21/01 – 15h)

As figuras 43, 44 e 45, ilustram a luminosidade (eixo vertical) em relação as coordenadas (x e y) do ambiente, para as 8 horas da manhã, meio dia e 17 horas da tarde, respectivamente, para o mês de junho.

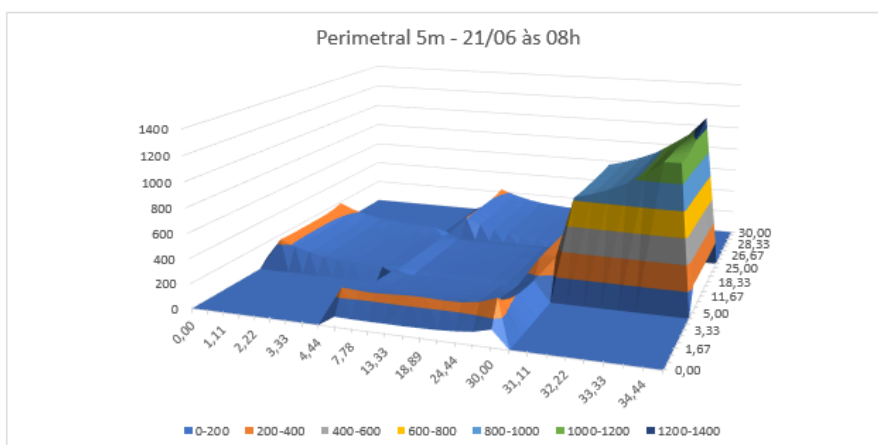


Figura 43 – Luminosidade do edifício perimetral 5m (21/06 – 08h)

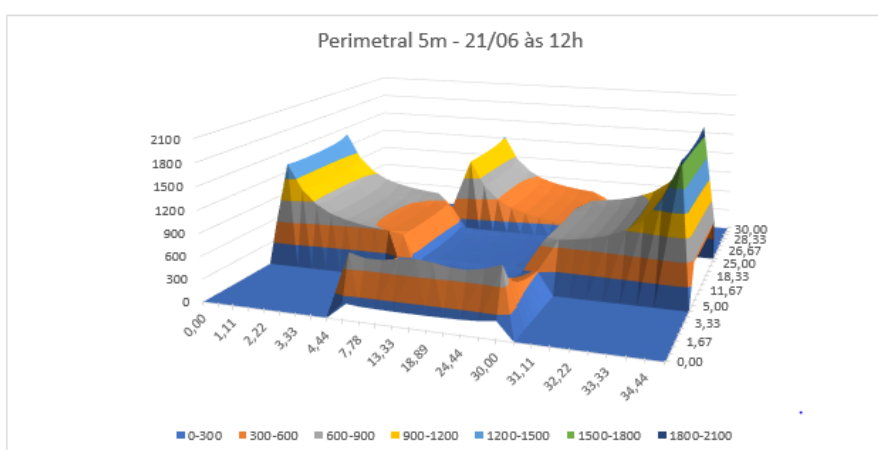


Figura 44 – Luminosidade do edifício perimetral 5m (21/06 – 12h)

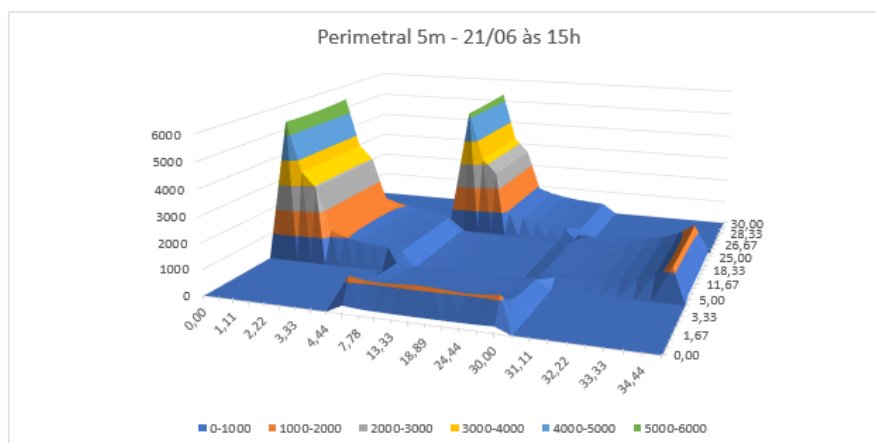


Figura 45 – Luminosidade do edifício perimetral 5m (21/06 – 15h)

10.4 Consumo de energia elétrica de iluminação

Realizou-se um estudo para determinar qual construção apresentaria melhor comportamento energético de iluminação para os dias 21 de janeiro e 21 de junho, representando o solstício de verão e o de inverno, respectivamente. Dessa forma, comparou-se o consumo de energia elétrica entre os edifícios perimetrais e o esbelto, sendo os resultados obtidos, apresentados nas figuras 46 e 47.

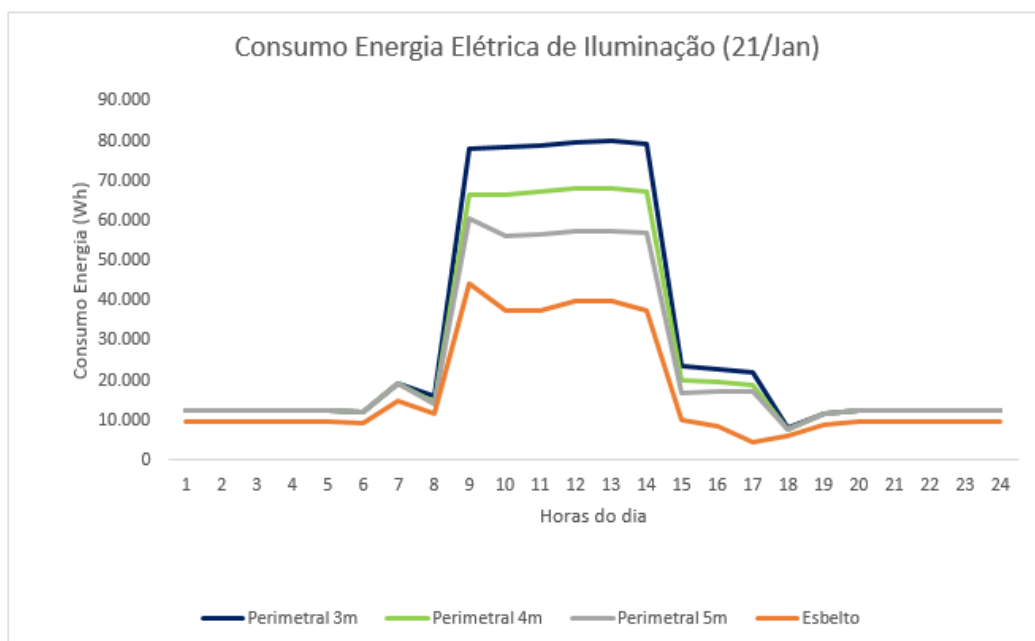


Figura 46 – Consumo de Energia Elétrica de Iluminação no Verão para os Edifícios Perimetrais e o Esbelto

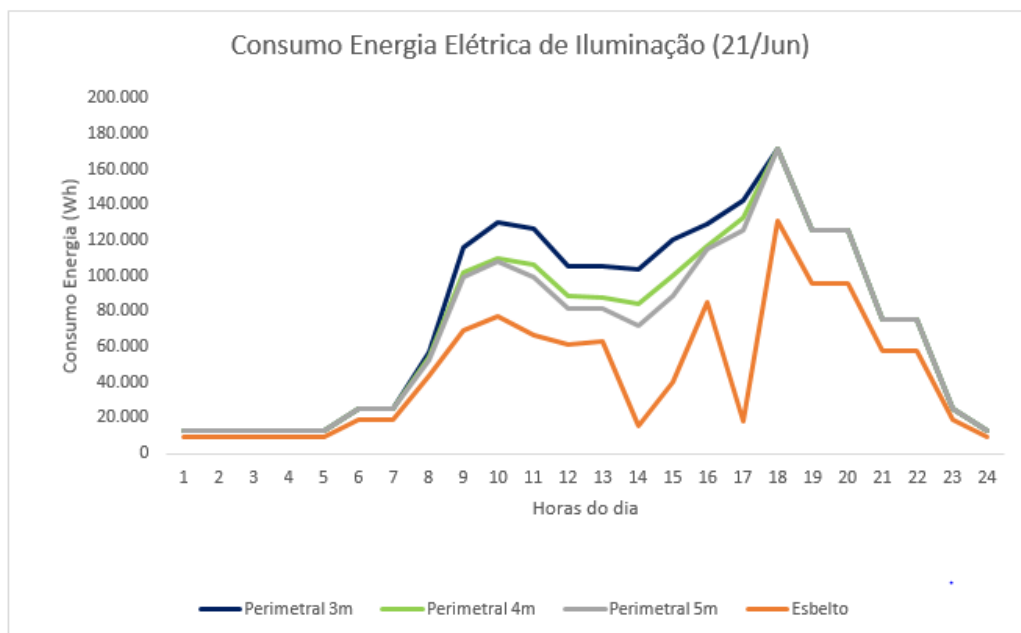


Figura 47 – Consumo de Energia Elétrica de Iluminação no Inverno para os Edifícios Perimetrais e o Esbelto

A partir dos gráficos apresentados, nota-se que durante o horário de funcionamento do edifício (9h às 18h), o edifício esbelto é o mais econômico e o perimetral de

3m o que mais demanda energia elétrica, independente do dia de análise. Entretanto, quando se compara os perimetrais de 4m e 5m, verifica-se que durante o verão, o perimetral de 4m apresenta um consumo menor que o de 5m, enquanto que no inverno, os consumos são muito próximos.

Ressalta-se que o edifício esbelto possui uma área total de 16.000 m^2 , inferior aos 21.000 m^2 dos demais edifícios. Assim, com o objetivo de realizar uma comparação justa, será realizado uma análise de consumo energético por metro quadrado no item 10.5.

Posteriormente, realizou-se a mesma análise para os edifícios esbelto, perimetral de 5m e o cenário 1 (item 7.1.1), em que os resultados são apresentados abaixo.

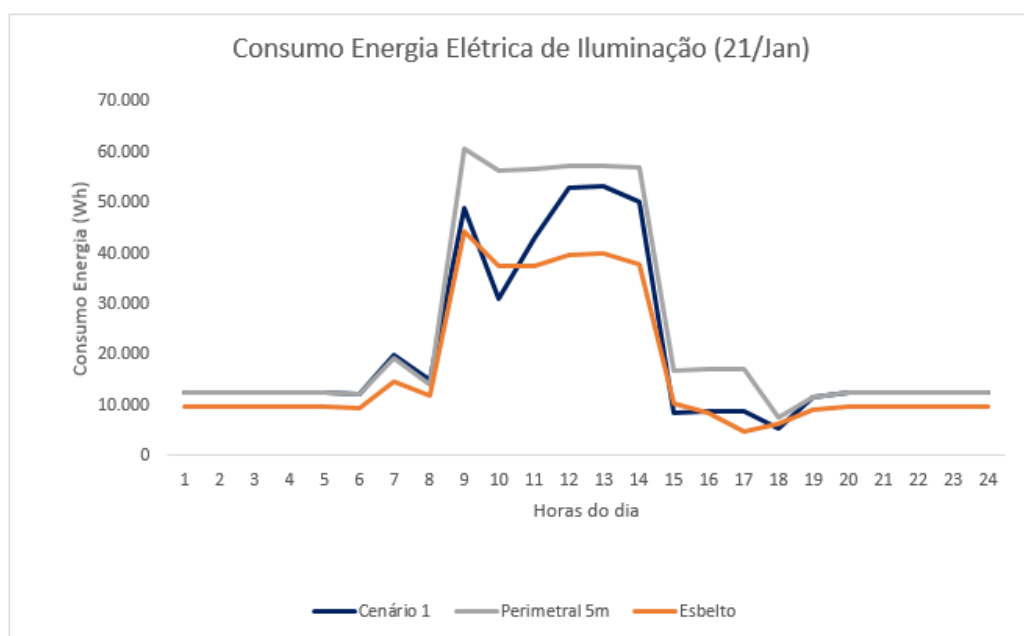


Figura 48 – Consumo de Energia Elétrica de Iluminação no Verão para os Edifícios Perimetral 5m, Esbelto e Cenário 1

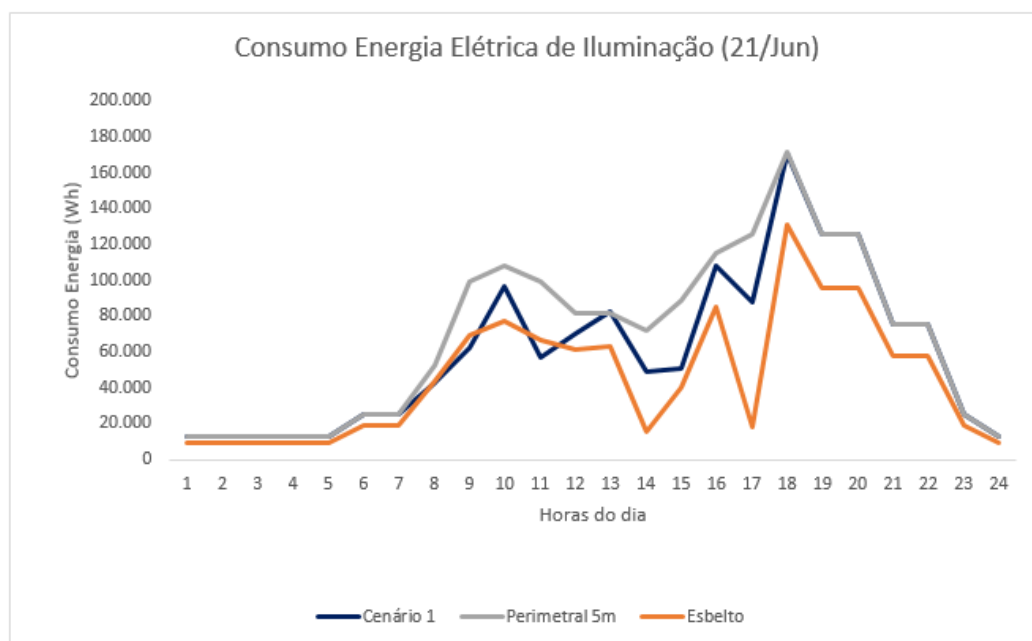


Figura 49 – Consumo de Energia Elétrica de Iluminação no Inverno para os Edifícios Perimetral 5m, Esbelto e Cenário 1

Com base nos gráficos acima, nota-se que tanto para o verão quanto para o inverno, o consumo de energia elétrica referente a iluminação do cenário 1 apresenta um valor intermediário em relação ao consumo do edifício perimetral 5m e esbelto.

10.5 Consumo total de energia elétrica

Como dito anteriormente, de forma a possuir uma comparação justa de consumo de energia elétrica entre os edifícios estudados, ou seja, perimetral 3m (p_3m), perimetral 4m (p_4m), perimetral 5m (p_5m), esbelto, cenário 1 (C1) e cenário 2 (C2), realizou-se um estudo do consumo total de energia elétrica dos edifícios, segregados nos sistemas de climatização, iluminação e equipamentos. Além disso, verificou-se o consumo de energia por metro quadrado, conforme a tabela abaixo.

Tabela 8 – Consumo anual de energia elétrica (kWh) para os edifícios estudados

Iluminação [kWh/m ²] >>	25,2	22,8	21,2	16,7	16,9	23,6
Total [kWh/m ²] >>	120,4	117,9	116,1	105,4	118,0	125,4
m ² >>	21.000	21.000	21.000	16.000	21.000	21.000
kWh	P_3m	P_4m	P_5m	Esbelto	C1	C2
Climatização	1.003.674	1.001.116	998.692	661.833	1.128.658	1.144.061
Resfriamento	440.398	443.039	444.961	299.308	493.896	498.881
Ventilação	471.757	465.979	461.433	305.642	535.711	550.762
Bombeamento	77.359	77.864	78.011	47.258	83.220	78.406
Torres de Resfriamento	14.160	14.234	14.287	9.625	15.830	16.013
Iluminação	529.622	479.719	445.103	266.405	353.923	495.310
Equipamentos	994.686	994.686	994.686	757.856	994.686	994.686
Total de utilização	2.527.981	2.475.521	2.438.481	1.686.094	2.477.267	2.634.057

Analisando somente os edifícios perimetrais, nota-se que quanto maior a largura da zona perimetral, menor o consumo de iluminação do edifício e consequentemente, menor o consumo anual total, visto que os sistemas de climatização e equipamentos apresentam comportamento semelhante.

Comparando os cenários 1 e 2, verifica-se que o cenário 1, onde os sensores de iluminação foram dispostos mais próximos das janelas, apresenta menor consumo de iluminação, refletindo em um menor consumo de energia total do edifício.

Por fim, pelo fato do edifício esbelto apresentar andares de menores dimensões, deve-se comparar o consumo de energia elétrica por metro quadrado da construção. Assim, confirma-se que o andar esbelto é o mais econômico das construções estudadas, tanto no consumo de energia referente ao sistema de iluminação, quanto ao consumo de energia total do edifício. Ressalta-se que o edifício perimetral p_5m (mais econômico entre os perimetrais), apesar de demandar maior consumo de energia elétrica por metro quadrado para suprir o sistema de iluminação, quando comparado com o edifício C1, é mais eficiente em relação ao consumo total.

11 Custo de Implantação do Sistema de dimerização

Após as análises energéticas realizadas anteriormente é importante realizar uma análise financeira da implantação do sistema de dimerização, a fim de verificar a viabilidade do projeto como um todo.

Para isso, primeiramente realizou-se um levantamento do custo tarifário de energia na cidade de São Paulo para, posteriormente, realizar o cálculo do custo mensal e anual de energia para cada edifício e, por fim, realizar o cálculo de *payback*, a fim de verificar qual configuração de edifício seria mais vantajosa no ponto de vista financeiro.

11.1 Custo Tarifário

Para obter o valor da tarifa de energia elétrica na cidade de São Paulo, consultou-se a AES Eletropaulo [28], empresa responsável pela distribuição de energia elétrica na cidade em estudo. Para edifícios comerciais, deve-se consultar o grupo A4 (clientes em alta e média tensão de fornecimento - 2,3 a 25 kV), conforme tabela abaixo.

Tabela 9 – Tarifas de Energia da AES Eletropaulo

MODALIDADE TARIFÁRIA	SUBGRUPOS					
	A4 (2,3 a 25kV)			AS (Subterrâneo)		
	Tarifa de uso do Sistema de Distribuição (TUSD)		Tarifa Energia (TE)	Tarifa de uso do Sistema de Distribuição (TUSD)		Tarifa de Energia (TE)
	Demanda (R\$/kW)	Energia (R\$/kWh)	Energia (R\$/kWh)	Demanda (R\$/kW)	Energia (R\$/kWh)	Energia (R\$/kWh)
TARIFA HORÁRIA AZUL						
PONTA	16,64	0,03677	0,34899	30,40	0,05387	0,34899
FORA PONTA	10,77	0,03677	0,22885	20,04	0,05387	0,22885
ULTRAPASSAGEM DE DEMANDA PONTA	33,28	-	-	60,80	-	-
ULTRAPASSAGEM DE DEMANDA FORA PONTA	21,54	-	-	40,08	-	-
ENERGIA REATIVA EXCEDENTE	-	-	0,23887	-	-	0,23887
TARIFA HORÁRIA VERDE						
PONTA	10,77	0,43987	0,34899	20,04	0,79121	0,34899
FORA PONTA		0,03677	0,22885		0,05387	0,22885
ULTRAPASSAGEM DE DEMANDA	21,54	-	-	40,08	-	-
ENERGIA REATIVA EXCEDENTE	-	-	0,23887	-	-	0,23887

Dados retirados da AES Eletropaulo [28]

A tarifa energética A4 pode ser separada em 2 subgrupos, a tarifa horária azul e

a verde. A tarifa verde possui um único valor de demanda e um valor mais elevado de transporte na ponta, em comparação com a tarifa azul.

Além disso, há informações sobre cobrança na ponta e fora de ponta, cobrança por excedente de uso (não será considerado na análise deste relatório) e separação entre cobrança por demanda e energia.

Com base nesses valores, simulou-se o custo tarifário no *software Energy Plus*, obtendo o custo mensal energético para a operação dos edifícios comerciais, em que os resultados podem ser vistos na tabela abaixo.

Tabela 10 – Custo energético dos edifícios C1, Esbelto, P_5m e Base

Tarifa Energética (Mil R\$)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Soma	% Redução em relação ao caso base
C1	85,2	78,3	87,4	75,2	81,8	78,8	75,7	80,3	78,7	78,6	80,9	80,2	961,1	-37%
Esbelto	56,8	52,4	58,1	51,4	57,3	55,0	53,4	55,3	54,2	54,4	54,9	53,9	656,9	-57%
P_5m	83,1	77,0	85,5	73,4	80,7	77,2	74,2	77,9	76,0	77,7	79,3	76,8	939,0	-38%
Base	144,4	133,1	142,6	126,0	116,9	117,3	118,1	113,9	122,2	125,9	123,7	136,7	1.520,8	-

A tabela 10 reforça as conclusões obtidas com a tabela 8, em que o edifício esbelto apresenta menor consumo de energia e consequentemente, menor custo energético anual, apresentando uma redução de custo de 57% em relação ao edifício base. Por fim, os edifício C1 e p_5m apresentam uma redução semelhante em relação ao caso base.

11.2 Payback do Investimento

Conforme dito anteriormente, após o levantamento dos dados de custo tarifário de energia elétrica, seguiu-se com o estudo de *payback* do investimento, ou seja, o tempo em meses que o custo para a implantação do sistema de dimerização seria compensado pela economia de energia que o sistema provém.

Ressalta-se que utilizou-se a taxa Selic como índice de juros dos investimentos. Dessa forma, considerando início do projeto em janeiro de 2018, utilizou-se a projeção do valor da taxa Selic do banco Itaú BBA para os anos de 2018 (6,5% a.a.), 2019 (6,5% a.a.) e 2020 (7,0% a.a.) [29].

Além disso, partindo de uma premissa conservadora, considerou-se que não haverá atualização nas tarifas de energia, visto que isto faria com que o valor da redução energética em relação ao caso base fosse maior, diminuindo o tempo de retorno do projeto.

Dessa forma, as tabelas 11 e 12 ilustram os principais resultados.

Tabela 11 – Estimativa do custo de implantação do sistema de dimerização

$W/m^2 >>$	12	12	12
$m^2 total >>$	21.000	16.000	21.000
Investimento	p_5m	Esbelto	C1
Pot ilum tot W	252.000	192.000	252.000
Qnt luminárias	2.100	1.600	2.100
Valor R\$	1.470.000	1.120.000	1.470.000

Tabela 12 – Cálculo do *Payback* do projeto

Economia Energia	p_5m	Esbelto	C1	Base
Custo energia ano (Mil R\$)	939	657	961	1.521
Economia ano (Mil R\$)	582	864	560	-
Payback meses	34	16	35	-

A tabela 11 ilustra uma estimativa do custo de implantação do sistema de dimerização para os edifícios p_5m, esbelto e C1. A partir do conhecimento da potência de iluminação instalada no edifício (W), dividiu-se este valor por 120W (luminária com 2 lâmpadas de 60W), obtendo a quantidade de luminárias necessárias no edifício. Por fim, multiplicou-se este valor por R\$ 700,00 (custo de cada luminária), obtendo uma estimativa para o custo de implantação da estratégia de dimerização em cada edifício.

Assim, nota-se que o custo de implantação dos edifícios C1 e p_5m são iguais e superiores em 30% em relação ao esbelto, devido a menor área de construção deste edifício.

Já a tabela 12 ilustra a determinação do tempo de retorno do projeto (*payback*). Com base nos resultados apresentados na tabela 10, determinou-se a economia financeira anual para cada edifício em relação ao caso base. Dessa forma, utilizando o valor de investimento determinado na tabela 11 e atualizando-o com base na taxa Selic, obteve-se o *payback* em meses para os edifícios estudados.

Com isso, mantendo a premissa de início de funcionamento do sistema de dimerização em janeiro de 2018, o edifício esbelto apresentaria retorno do investimento em maio de 2019 (16 meses posterior ao início), enquanto que os edifícios p_5m e C1 só apresentariam retorno no final de 2020.

12 Conclusão

Com base nas informações levantadas, nota-se que as estratégias de sombreamento e dimerização possuem potencial de redução do consumo de energia elétrica.

Inicialmente, verificou-se que a adoção do sistema de dimerização proporciona uma redução média de 35% no consumo anual de energia elétrica, para as disposições dos sensores simuladas (edifícios C1 e C2). Por outro lado, a estratégia de sombreamento não apresentou impacto tão relevantes.

Além disso, ao analisar o impacto combinado das estratégias, nota-se que há um acréscimo no valor de consumo de energia elétrica anual, por conta do controle de sombreamento, impactando o desempenho do sistema de dimerização, impedindo que este otimize energeticamente o edifício.

Por conta destes motivos, decidiu-se realizar um estudo mais aprofundado da estratégia de dimerização, analisando o consumo energético de outras quatro construções (edifícios perimetrais p_3m, p_4m e p_5m e edifício esbelto) em comparação com os edifícios C1 e C2. A partir disso, nota-se que o edifício esbelto é o mais econômico, seguido pelo perimetral p_5m, que possui a vantagem de controlar melhor o funcionamento do sistema de dimerização, por conta da melhor distribuição dos sensores de luminosidade no ambiente, impedindo que alguma região do andar fique com um nível de iluminação abaixo de 500 *lux* (nível ótimo).

Por fim, realizou-se um estudo econômico do projeto, a fim de estimar o custo de implantação do sistema de dimerização nos edifícios p_5m, esbelto e C1, além da determinação do *payback* do projeto em relação ao consumo energético do edifício base. Assim, estimou-se um valor de R\$ 1,47 milhões para os projetos dos edifícios C1 e p_5m, apresentando um *payback* em 35 meses e um valor de R\$ 1,12 milhões para o edifício esbelto, apresentando um tempo de retorno em 16 meses.

Ressalta-se que os valores obtidos de custo de implantação e tempo de *payback* são uma estimativa, visto que o ideal seria a partir de um projeto luminotécnico definido, realizar uma cotação do real custo de implantação do sistema de dimerização, podendo então, calcular o *payback* do projeto.

Para projetos futuros, além da necessidade de realizar um projeto luminotécnico para o cálculo de *payback*, sugere-se uma análise do comportamento do sistema de dimerização frente aos diversos climas do Brasil, de forma a entender em qual região brasileira este sistema será mais eficiente.

Referências

- [1] ANEEL, Relatórios de consumo e receita. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>>. Acesso em 8 Out. 2016.
- [2] ASHRAE. Norma ASHRAE 90.1. ASHRAE STANDARD Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, ASHRAE, 190 páginas, 2007.
- [3] ABNT. NBR 16401-1, Instalações de Ar Condicionado - Sistemas Centrais e Unitários Parte 1: Projeto das Instalações.
- [4] M.S. Alrubaih, M.F.M. Zain, M.A. Alghoul, N.L.N. Ibrahim, M.A. Shameri, O. Elayeb. Research and development on aspects of daylighting fundamentals, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21 (1), pp. 494–505, 2013.
- [5] M. Krarti, P.M. Erickson, T.C. Hillman, A simplified method to estimate energy savings of artificial lighting use from daylighting, *Building and Environment*, vol. 40, pp. 747-754, 2005.
- [6] M.B. Hirning, G.L. Isoardi, I. Cowling, Discomfort glare in open plan green buildings, *Energy and Buildings*, vol. 70, pp. 427–440, 2014.
- [7] M.B.C. Aries, J.A. Veitch, G.R. Newsham, Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort, *Journal of Environmental Psychology*, vol. 30, pp. 533–541, 2010.
- [8] M. Boubekri, L.L. Boyer, Effect of window size and sunlight presence on glare, *Lighting Research and Technology*, vol. 24 (2), pp. 69–74, 1992.
- [9] P. Leather, M. Pyrgas, D. Beale, C. Lawrence, Windows in the workplace: sunlight, view, and occupational stress, *Environment and Behavior*, pp. 739–762, 1998.
- [10] A. Tzempelikos and A. K. Athienitis, The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. *Solar Energy*, vol. 81, no. 3, pp. 369–382, 2007.
- [11] L. Bellia, C. Marino, F. Minichiello, and A. Pedace, “An overview on solar shading systems for buildings,” *Energy Procedia*, vol. 62, pp. 309–317, 2014.

- [12] A. Kirmat, B. K. Koyunbaba, I. Chatzikonstantinou, and S. Sariyildiz, "Review of simulation modeling for shading devices in buildings," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 23–49, 2016.
- [13] Y. Huang, J. Niu, and T. Chung, "Comprehensive analysis on thermal and daylighting performance of glazing and shading designs on office building envelope in cooling-dominant climates," *Appl. Energy*, vol. 134, pp. 215–228, 2014.
- [14] M. Bodart and A. De Herde, "Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting," *Energy Build.*, vol. 34, no. 5, pp. 421–429, 2002.
- [15] L. Long and H. Ye, "Discussion of the performance improvement of thermochromic smart glazing applied in passive buildings," *Sol. Energy*, vol. 107, pp. 236–244, 2014.
- [16] M. Konstantoglou and A. Tsangrassoulis, "Dynamic operation of daylighting and shading systems: A literature review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 268–283, 2016.
- [17] C. F. Reinhart and K. Voss, "Monitoring manual control of electric lighting and blinds," *Light. Res. Technol.*, vol. 35, no. 3, pp. 243–258, 2003.
- [18] A. Williams, B. Atkinson, K. Garbesi, F. Rubinstein, and E. Page, "A Meta-Analysis of Energy Savings from Lighting Controls in Commercial Buildings," Lawrence Berkeley national laboratory, no. September 2011.
- [19] E. S. Lee and S. E. Selkowitz, "The New York Times Headquarters daylighting mockup: Monitored performance of the daylighting control system," *Energy Build.*, vol. 38, no. 7, pp. 914–929, 2006.
- [20] A. Chel, G. N. Tiwari, and H. N. Singh, "A modified model for estimation of daylight factor for skylight integrated with dome roof structure of mud-house in New Delhi (India)," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 10, pp. 3037–3050, 2010.
- [21] CIBSE, Chartered institution of building services engineers, CIBSE Code for Lighting Part 2, 2002.
- [22] A. S. Choi, K. D. Song, and Y. S. Kim, "The characteristics of photosensors and electronic dimming ballasts in daylight responsive dimming systems," *Build. Environ.*,

vol. 40, no. 1, pp. 39–50, 2005.

[23] Guidance for electric metering in federal buildings, U. S. department of energy. 2006.

[24] C. F. Reinhart and K. Voss, “Monitoring manual control of electric lighting and blinds,” *Light. Res. Technol.*, vol. 35, no. 3, pp. 243–258, 2003.

[25] D. Bourgeois and I. Macdonald, “Adding advanced behavioural models in whole building energy simulation: A study on the total energy impact of manual and automated lighting control,” *Energy Build.*, vol. 38, no. 7, pp. 814–823, 2006.

[26] D. H. W. Li and E. K. W. Tsang, “An analysis of measured and simulated daylight illuminance and lighting savings in a daylight corridor,” *Build. Environ.*, vol. 40, no. 7, pp. 973–982, 2005.

[27] N. Lee, J. Kim, C. Jang, Y. Sung, and H. Jeong, “Comparison of sensorless dimming control based on building modeling and solar power generation,” *Energy*, vol. 81, pp. 15–20, 2015.

[28] AES ELETROPAULO, Tarifa de energia elétrica. Disponível em: <<https://www.aeseletropaulo.com.br/cliente-corporativo/prazos-e-tarifas/conteudo/tarifa-de-energia-eletrica>>. Acesso em 29 Out. 2017.

[29] ITAU BBA, Brazil long run scenario. Disponível em: <<https://www.italu.com.br/itaubba-en/economic-analysis/forecasts/brazil-long-run-scenario-november-2017>>. Acesso em 29 Out. 2017.