

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE**

**AVALIAÇÃO DO USO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM  
FAZENDA VERTICAL SIMULADA**

**ALLYSON FREIRES CUSTÓDIO DA SILVA**

**CAMPO GRANDE**

**2019**

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE**

**AVALIAÇÃO DO USO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM  
FAZENDA VERTICAL SIMULADA**

**ALLYSON FREIRES CUSTÓDIO DA SILVA**

Trabalho de Conclusão de Curso do Programa de Mestrado Profissional apresentado na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração Eficiência Energética.

**Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Andréa Teresa Riccio Barbosa**

**CAMPO GRANDE  
OUTUBRO / 2019**

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Redação final do Trabalho de Conclusão de Curso defendida por **ALLYSON FREIRES CUSTÓDIO DA SILVA**, aprovada pela Comissão Julgadora em 03 de setembro de 2019, na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.



---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Andréa Teresa R. Barbosa – Orientadora  
FAENG/UFMS

---

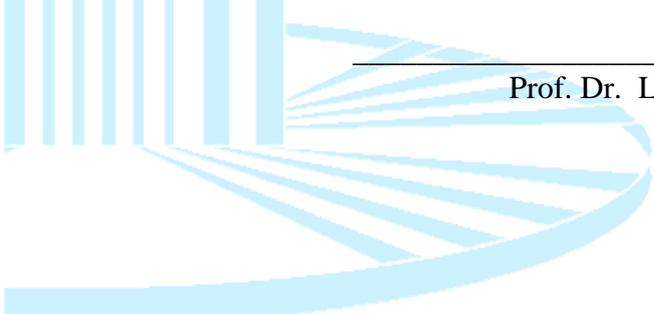
Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ana Paula Milani – Membro Titular  
FAENG/UFMS

---

Prof. Dr. José Carlos de Jesus Lopes – Membro Titular  
FAENG/UFMS

---

Prof. Dr. Leandro Pessoa de Lucena – Membro Titular  
CUR/UFMT



## RESUMO

A Fazenda Vertical é definida como um modelo de produção agrícola dentro de edifícios, verticalizado e com ambiente controlado. A proposta desse tipo de cultivo, comparado à agricultura horizontal, é propiciar cerca da metade do tempo do ciclo final produtivo, maximizar a produção no espaço físico, propiciar a ausência do uso de defensivos agrícolas e possibilitar que o produto saia pronto para o cliente final (consumidor), com baixo custo de transporte. Entretanto, o alto consumo energético, ocasionado pelo uso de iluminação artificial, de bombeamento hidráulico e de resfriamento/aquecimento, está comprometendo a viabilização desse modelo de produção agrícola. Diante desse contexto, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar o uso da energia solar fotovoltaica na operação de Fazendas Verticais, em galpões convencionais, para a região de Campo Grande/MS, pois a cidade apresenta grande potencial energético para uso de painéis solares. Primeiramente, fez-se um levantamento bibliográfico sistemático em que foram encontradas pesquisas que abordam sobre o uso/consumo de energia em Fazendas Verticais. Na sequência, simulações do desempenho térmico e energético de galpão industrial foram realizadas, com três diferentes áreas (100 m<sup>2</sup>, 300 m<sup>2</sup> e 500 m<sup>2</sup>), usando o *DesignBuilder*, com condições propícias para o cultivo de alface hidropônica. Na simulação, observou-se um alto ganho térmico devido à necessidade do uso intensivo das luminárias em LED. Com isso, buscou-se possíveis soluções de eficiência energética para o galpão simulado, resultando na criação de três novos Cenários. O galpão de 500 m<sup>2</sup>, sob o Cenário 3, foi o que apresentou os melhores resultados em relação ao Percentual anual de horas Ocupadas em Conforto (POC 30 °C) para a produção e em relação ao consumo energético específico por alface produzido, chegando a atingir 1,63 kWh/alface. O potencial encontrado para diminuir o uso de energia fornecida pela Concessionária, através dos painéis fotovoltaicos, foi de até 20,87%, resultando no consumo mínimo de 1,16 kWh/alface. Verificou-se que, para as simulações, o elevado uso da luz artificial levou à impossibilidade de se tornar atrativo o uso da energia fotovoltaica no cultivo de alface hidropônico, nas condições e modelos de galpão utilizados. Em se tratando de alface, dificilmente se pode viabilizar uma Fazenda Vertical, pois o custo de 1,16 kWh/alface onera o preço final do produto. Porém, quando se adota o cultivo vertical de plantas com maior valor de mercado, o consumo de 1,16 kWh/planta pode se tornar altamente viável, técnica e economicamente.

Palavras-chaves: eficiência energética, agricultura vertical, simulação termo energética.

## ABSTRACT

The Vertical Farm is defined as a vertically integrated, environmentally controlled agricultural production model within buildings. A proposal for this type of crop, compared to horizontal agriculture, provides about half of the end product cycle time, maximizes production in the physical space, allows for the loss of pesticide use and allows the product to come out ready for the customer (consumer), with low transportation cost. However, the high energy consumption, caused by the use of artificial lighting, hydraulic pumping and cooling/heating, is compromising the viability of this agricultural production model. Given this context, the aim of this research was to evaluate the use of photovoltaic solar energy in the operation of Vertical Farms, in industrial warehouses, for a region of Campo Grande/MS, as the city has a great energy potential for the use of solar panels. Firstly, it made a systematic bibliographic survey in which were found researches that deal with the use/consumption of energy in Vertical Farms. Thereafter, simulations of thermal and energy performance of the industrial warehouses were performed, with three different areas (100 m<sup>2</sup>, 300 m<sup>2</sup> and 500 m<sup>2</sup>), using *DesignBuilder*, with favorable conditions for hydroponics cultivation. In the simulation, it was observed a high gain due to the intensive use of LED luminaires. This gives you energy efficient solutions for the simulated warehouse, resulting in the creation of three new Scenarios. The 500 m<sup>2</sup> warehouse, in Scenario 3, showed the best results in relation to the Percentage of hours Occupied in Comfort (POC 30 ° C) for production and in relation to the specific energy consumption per produced surface, reaching 1, 63 kWh/lettuce. The potential found to reduce the utility's energy use through photovoltaic panels was up to 20.87%, resulting in a minimum consumption of 1.16 kWh/lettuce. It was found that, for simulations, the high use of artificial light made it impossible to make the use of photovoltaic energy attractive in the cultivation of a hydroponic surface under the conditions and models of industrial warehouses used. For lettuce, a Vertical Farm can hardly be viable, as the cost is 1.16 kWh/lettuce to the final price of the product. However, when adopting vertical cultivation of plants with higher market value, the consumption of 1.16 kWh/plant can become highly feasible, technically and economically.

Keywords: energy efficiency, vertical farming, thermal energy simulation.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>FIGURA 1</b> - Modelos de agricultura vertical <i>indoor</i> . .....	29
<b>FIGURA 2</b> - Produção anual de tomate por m <sup>2</sup> em diferentes modelos de produção (Lisboa/Pt). .....	34
<b>FIGURA 3</b> - Consumo de água por Kg de tomate produzido em diferentes modelos de produção. ....	34
<b>FIGURA 4</b> - Consumo de energia elétrica/Kg de tomate produzido em diferentes modelos de produção. ....	35
<b>FIGURA 5</b> - Protótipo de Fazenda Vertical em <i>container</i> . .....	35
<b>FIGURA 6</b> - Projeto europeu de Fazenda Vertical com sistema de bandejas manuais.....	36
<b>FIGURA 7</b> - Efeito da PPFd e do fotoperíodo no desenvolvimento da alface.....	43
<b>FIGURA 8</b> - Diagrama de insolação (Plantas de Corte).....	46
<b>FIGURA 9</b> - Aplicação de células fotovoltaicas de filme fino em cobertura de vidro. ....	48
<b>FIGURA 10</b> - Etapas do projeto. ....	54
<b>FIGURA 11</b> - Média anual de temperatura em Campo Grande/MS (°C). ....	56
<b>FIGURA 12</b> - Média anual de insolação em Campo Grande/MS (horas).....	57
<b>FIGURA 13</b> - Planta das três diferentes áreas do galpão. ....	59
<b>FIGURA 14</b> – Galpão (modelo de 100 m <sup>2</sup> de área produtiva) simulado nessa pesquisa. ....	59
<b>FIGURA 15</b> - Planta baixa do galpão (modelo de 100 m <sup>2</sup> de área produtiva). ....	60
<b>FIGURA 16</b> - Estudo de insolação nas fachadas no Solstício de Inverno (dia 21.06) – <i>software Sketchup</i> .....	61
<b>FIGURA 17</b> - Estudo de insolação nas fachadas no Solstício de Verão (dia 21.12) – <i>software Sketchup</i> .....	63
<b>FIGURA 18</b> - Etapas da simulação ( <i>DesignBuilder</i> ). ....	64
<b>FIGURA 19</b> - Janela de abertura de novo projeto no <i>DesignBuilder</i> .....	64
<b>FIGURA 20</b> - Galpão de 100 m <sup>2</sup> modelado no <i>DesignBuilder</i> . ....	65
<b>FIGURA 21</b> - Luminária de LED <i>Philips Green Power</i> . ....	70
<b>FIGURA 22</b> - Perspectiva do módulo da "estrutura aramada com abordagem de fábrica", em sistema hidropônico, adotado na pesquisa.....	71
<b>FIGURA 23</b> – Condicionador de ar de teto Samsung usado na simulação. ....	82
<b>FIGURA 24</b> - Painel solar Yingli YL330P-35B.....	84
<b>FIGURA 25</b> - Fluxograma dos elementos constituintes do método da pesquisa. ....	86

<b>FIGURA 26</b> - Fluxograma do estudo de ações de eficiência energética.....	95
<b>FIGURA 27</b> - Perspectiva do galpão de 100 m <sup>2</sup> no Cenário 2. ....	96
<b>FIGURA 28</b> - Perspectiva do galpão de 100 m <sup>2</sup> no Cenário 3. ....	96
<b>FIGURA 29</b> – Estudo de insolação nas fachadas do Cenário 2, no Solstício de Verão (21/12). .....	97
<b>FIGURA 30</b> – Estudo de insolação no Cenário 2, no Solstício de Inverno (21/06).....	98
<b>FIGURA 31</b> - Estudo de insolação no Cenário 3, no Solstício de Verão (21/12).....	99
<b>FIGURA 32</b> - Estudo de insolação no Cenário 3, no Solstício de Inverno (21/06). ....	100

## LISTA DE QUADROS

<b>QUADRO 1</b> - Simulação de produção agrícola de tomate em Lisboa, Portugal.....	33
<b>QUADRO 2</b> - Critérios de inclusão.....	55
<b>QUADRO 3</b> - Trabalhos encontrados no banco de dados <i>Scopus</i> .....	87
<b>QUADRO 4</b> - Artigos selecionados para leitura completa.....	88
<b>QUADRO 5</b> - Trabalhos excluídos.....	89
<b>QUADRO 6</b> - Trabalhos incluídos.....	89



## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1</b> - Uso de PSFs (Painéis Solares Fotovoltaicos) em diferentes áreas de Fazendas Verticais.....	58
<b>TABELA 2</b> - Resumo das informações inseridas no menu " <i>Activity</i> " do <i>DesignBuilder</i> . .....	69
<b>TABELA 3</b> - Resumo das informações inseridas no menu " <i>Lighting</i> " do <i>DesignBuilder</i> . .....	81
<b>TABELA 4</b> - Resumo dos resultados das simulações aplicadas.....	94
<b>TABELA 5</b> - Resumo das informações alteradas nos novos Cenários propostos perante a linha de base. ....	104
<b>TABELA 6</b> - Resumo das informações de iluminação dos modelos de galpão (Cenário 3). .....	115
<b>TABELA 7</b> - Resumo dos resultados da simulação com o Cenário 3.....	120

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>GRÁFICO 1</b> - POC dos ambientes produtivos sob ventilação natural – 30 °C.....	90
<b>GRÁFICO 2</b> - Temperatura ambiental nas salas produtivas do galpão de 100 m <sup>2</sup> sob ventilação natural, no Solstício de Verão (dia 21/12).....	91
<b>GRÁFICO 3</b> - Consumo mensal de energia elétrica para cada modelo de galpão simulado (kWh/mês).....	92
<b>GRÁFICO 4</b> - Consumo anual de energia elétrica em cada modelo de galpão simulado (kWh/ano).....	92
<b>GRÁFICO 5</b> - Consumo de energia elétrica por unidade de alface (kWh/alface).....	93
<b>GRÁFICO 6</b> - Ganho térmico nos novos Cenários propostos (kWh/ano).....	105
<b>GRÁFICO 7</b> - Percentual de horas Ocupadas em Conforto a até 30 °C (POC 30 °C).....	106
<b>GRÁFICO 8</b> - Temperatura ambiental na sala de geminação dos novos Cenários propostos perante a linha de base, no Solstício de Verão (dia 21/12).....	107
<b>GRÁFICO 9</b> - Temperatura ambiental no mezanino dos novos Cenários propostos perante a linha de base, no Solstício de Verão (dia 21/12).....	107
<b>GRÁFICO 10</b> - Temperatura ambiental na sala de produção dos novos Cenários propostos perante a linha de base, no Solstício de Verão (dia 21/12).....	108
<b>GRÁFICO 11</b> - Consumo mensal de energia elétrica dos novos Cenários perante a linha de base (kWh/mês).....	108
<b>GRÁFICO 12</b> - Consumo anual de energia elétrica dos novos Cenários perante a linha de base (kWh/ano).....	109
<b>GRÁFICO 13</b> - Percentual de horas Ocupadas em Conforto a até 30 °C (POC 30 °C) para os galpões no Cenário 3. ....	116
<b>GRÁFICO 14</b> - Temperatura ambiental na sala de produção dos galpões simulados no Cenário 3, no Solstício de Verão (dia 21/12).....	117
<b>GRÁFICO 15</b> - Temperatura ambiental na sala de geminação dos galpões simulados no Cenário 3, no Solstício de Verão (dia 21/12).....	117
<b>GRÁFICO 16</b> - Temperatura ambiental no mezanino dos galpões simulados no Cenário 3, no Solstício de Verão (dia 21/12).....	118
<b>GRÁFICO 17</b> - Consumo mensal de energia elétrica para cada modelo de galpão simulado no Cenário 3 (kWh/mês).....	118

<b>GRÁFICO 18</b> - Consumo anual de energia elétrica para cada modelo de galpão simulado no Cenário 3 (kWh/ano). .....	119
<b>GRÁFICO 19</b> - Consumo de energia elétrica por alface produzido no Cenário 3 (kWh/alface). .....	119
<b>GRÁFICO 20</b> - Percentual de abatimento da energia fotovoltaica perante a concessionária de energia. ....	123

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise do Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar- Condicionado)
CoP	Coefficiente de Performance
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
HVAC	<i>Heating, Ventilating and Air Conditioning</i> (Aquecimento, Ventilação e Ar- Condicionado)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPTU	Imposto Predial e Territorial Urbano
IRC	Índice de Reprodução de Cor
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para padronização)
LED	Diodo Emissor de Luz
MS	Mato Grosso do Sul
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
ONU	Organização das Nações Unidas
PBE	Prática Baseada em Evidência
PIB	Produto Interno Bruto
POC	Percentual anual de horas Ocupadas em Conforto
PPF	<i>Photosynthetic Photon Flux</i> (Fluxo de Fótons Fotossintéticos)
PPFD	<i>Photosynthetic Photon Flux Density</i> (Densidade de Fluxo de Fótons Fotossintéticos)
PSF	Painel Solar Fotovoltaico
PVA	Acetato de Polivinila
PVC	Policloreto de polivinila
SAN	Segurança Alimentar e Nutricional

TIR	Taxa Interna de Retorno
UNFAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura)
VPL	Valor Presente Líquido
WWF	<i>World Wide Fund for Nature</i> (Fundo Mundial para a Natureza)

## LISTA DE SÍMBOLOS

gha	Unidade de medida de hectares globais
%	Porcentagem
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
kg	Unidade de medida de massa em quilograma
m <sup>2</sup>	Unidade de medida de área em metro quadrado
kg/m <sup>2</sup> /ano	Unidade de medida de massa em quilograma por metro quadrado por ano
kWh/kg	Unidade de medida de energia em quilowatt-hora por quilograma
h	Unidade de medida de tempo em horas
kWh/dia	Unidade de medida de energia em quilowatt-hora por dia
kWh/planta	Unidade de medida de energia em quilowatt-hora por unidade de planta
kWh/alface	Unidade de medida de energia em quilowatt-hora por unidade de alface
kWh/ano	Unidade de medida de energia em quilowatt-hora por ano
HP	Unidade de medida de potência elétrica em <i>Horse-Power</i> (cavalo-vapor)
g	Unidade de medida de massa em grama
kcal	Unidade de medida de energia em quilocaloria
μmol.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	Unidade de medida de densidade de fluxo de fótons em micromol por metro quadrado por segundo
μmol/s	Unidade de medida de fluxo de fótons em micromol por segundo
m/s	Unidade de medida de velocidade em metro por segundo
TWh/ano	Unidade de medida de energia em Terawatt-hora por ano
kW	Unidade de medida de potência elétrica em Kilowatt
mm	Unidade de medida de comprimento em milímetro
cm <sup>2</sup>	Unidade de medida de área em centímetro quadrado
W	Unidade de medida de potência elétrica em watt
Wh/dia	Unidade de medida de energia em watt-hora por dia
W/W	Unidade de medida de coeficiente de performance
°C	Unidade de medida de temperatura em graus Celsius
km	Unidade de medida de comprimento em quilômetro
ha	Unidade de medida de área em hectares
cm	Unidade de medida de comprimento em centímetro
ml	Unidade de medida de volume em mililitro

K	Unidade de medida de temperatura em Kelvin
lm	Unidade de medida de fluxo luminoso
lx	Unidade de medida de intensidade luminosa em lux
$\rho$	Unidade de medida de densidade
$\lambda$	Unidade de medida de condutividade térmica
c	Unidade de medida de calor específico
R	Unidade de medida de resistência térmica
Wp	Unidade de potência elétrica em watt-pico
kWp	Unidade de potência elétrica em quilowatt-pico
U	Unidade de medida de transmitância térmica
nm	Unidade de medida em nanômetro

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
<b>1.1 Objetivos</b> .....	<b>21</b>
1.1.1 <i>Objetivo geral</i> .....	21
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	22
<b>1.2 Justificativa</b> .....	<b>22</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>25</b>
<b>2.1 Histórico da Fazenda Vertical</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2 O abastecimento agrícola nas cidades</b> .....	<b>27</b>
<b>2.3 Agravos da agricultura extensiva</b> .....	<b>30</b>
<b>2.4 O consumo dos recursos</b> .....	<b>32</b>
<b>2.5 Necessidades da cultura vegetal</b> .....	<b>38</b>
2.5.1 <i>Hidroponia</i> .....	38
2.5.2 <i>Solução nutricional</i> .....	39
2.5.3 <i>Conforto térmico</i> .....	40
2.5.4 <i>Conforto lumínico</i> .....	41
<b>2.6 Soluções energéticas</b> .....	<b>44</b>
2.6.1 <i>A energia solar fotovoltaica na agricultura indoor</i> .....	47
<b>2.7 Estudos de viabilidade econômica em Fazendas Verticais</b> .....	<b>50</b>
<b>3 MÉTODO DA PESQUISA</b> .....	<b>53</b>
<b>3.1 Revisão Bibliográfica Sistemática</b> .....	<b>54</b>
<b>3.2 Local da pesquisa e cultura vegetal</b> .....	<b>56</b>
3.2.1 <i>Local da pesquisa</i> .....	56
3.2.2 <i>Cultura vegetal</i> .....	57
<b>3.3 Modelagem 3D do galpão para a Fazenda Vertical</b> .....	<b>57</b>
<b>3.4 Simulação do desempenho térmico e energético</b> .....	<b>63</b>
3.4.1 <i>Configuração dos Templates de Atividades</i> .....	65
3.4.1.1 <i>Sala de produção</i> .....	65
3.4.1.2 <i>Sala de germinação</i> .....	66
3.4.1.3 <i>Sala de administração</i> .....	66
3.4.1.4 <i>Depósito</i> .....	67

3.4.1.5 Circulação .....	67
3.4.1.6 Banheiros.....	68
3.4.2 Configuração das propriedades térmicas da construção .....	68
3.4.3 Configuração das aberturas .....	68
3.4.4 Configuração das luminárias .....	70
3.4.4.1 Sala de produção .....	73
3.4.4.1.1 Galpão de 100 m <sup>2</sup> .....	73
3.4.4.1.2 Galpão de 300 m <sup>2</sup> .....	74
3.4.4.1.3 Galpão de 500 m <sup>2</sup> .....	75
3.4.4.2 Sala de geminação.....	76
3.4.4.3 Cálculo do valor de “Normalised power density” .....	78
3.4.4.3.1 Galpão de 100 m <sup>2</sup> .....	78
3.4.4.3.2 Galpão de 300 m <sup>2</sup> .....	79
3.4.4.3.3 Galpão de 500 m <sup>2</sup> .....	80
3.4.5 Configuração do sistema HVAC.....	82
<b>3.5 Descrição do sistema hidropônico .....</b>	<b>83</b>
<b>3.6 Estudo de ações de eficiência energética (pós-simulação).....</b>	<b>83</b>
<b>3.7 Uso dos painéis fotovoltaicos .....</b>	<b>84</b>
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>87</b>
<b>4.1 Revisão Sistemática .....</b>	<b>87</b>
<b>4.2 Simulação .....</b>	<b>90</b>
<b>4.3 Estudo de ações de eficiência energética.....</b>	<b>95</b>
4.3.1 Configuração das luminárias dos novos Cenários .....	100
4.3.1.1 Sala de produção .....	101
4.3.1.2 Sala de geminação.....	102
4.3.1.3 Cálculo do valo de “Normalised power density” .....	103
4.3.2 Resultados da análise dos novos Cenários .....	105
<b>4.4 Simulações com o Cenário 3 .....</b>	<b>109</b>
4.4.1 Galpão com 300 m <sup>2</sup> de área produtiva (Cenário 3).....	109
4.4.1.1 Sala de produção .....	109
4.4.1.2 Sala de geminação.....	111
4.4.1.3 Valor de “Normalised power density” para o galpão de 300 m <sup>2</sup> (Cenário 3) .....	111

<i>4.4.2 Galpão com 500 m<sup>2</sup> de área produtiva (Cenário 3)</i> .....	112
<i>4.4.2.1 Sala de produção</i> .....	112
<i>4.4.2.2 Sala de germinação</i> .....	113
<i>4.4.2.3 Valor de “Normalised power density” para o galpão de 500 m<sup>2</sup> (Cenário 3)</i> .....	113
<i>4.4.3 Resultados das simulações com o Cenário 3</i> .....	114
<b>4.5 Painéis fotovoltaicos</b> .....	121
<b>5 DISCUSSÃO</b> .....	<b>125</b>
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>127</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>131</b>
<b>8 ANEXO A</b> .....	<b>141</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente existe a conscientização de que os recursos alimentares e energéticos do planeta são limitados. Logo, é imprescindível que se disponha de novas alternativas para repor esses recursos sem prejudicar o meio ambiente.

Essa limitação de recursos é observada em muitos domicílios brasileiros, que não possuem acesso regular a alimentos. Segundo a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (BRASIL, 2014), aproximadamente 22,6% dos domicílios brasileiros apresentam condições de Insegurança Alimentar e Nutricional, ou seja, algo em torno de 52 milhões de moradores não possuem alimentos em quantidade e/ou qualidade suficientes. No mundo, o número de pessoas inseridas na zona de Insegurança Alimentar e Nutricional é próximo de 815 milhões. A Ásia é o continente com dados mais preocupantes, com cerca de 520 milhões de habitantes dentro dessa estatística (ONU, 2016).

Como agravante, a ONU projeta que, no ano de 2050, a humanidade chegue ao número de 9,8 bilhões de habitantes, o que implicará em adicionar 1 bilhão de hectares para a produção de alimentos, medida pouco maior que a área do território brasileiro (UNITED NATIONS NEWS CENTRE, 2017). O problema é que não existe essa quantidade de terra com qualidade para o plantio (ALEXANDRATOS; BRUINSMA, 2012).

Além disso, o uso desordenado do solo tomado pela agricultura extensiva causa problemas ao meio ambiente, como os processos intensos de erosão, inundações e assoreamento de reservatórios e cursos d'água. Deve-se destacar também a ligação direta entre as mudanças climáticas, o uso de combustíveis fósseis e os desmatamentos em favor do aumento de áreas cultiváveis. Em países industrializados, por exemplo, até 20% dos combustíveis fósseis são queimados nos processos que envolvem a agricultura convencional. De forma complementar, as mudanças climáticas podem contaminar o solo, até mesmo alterar suas propriedades, impossibilitando a atividade agrícola. No rol dos impactos ambientais negativos, os desmatamentos prejudicam a qualidade do ar, pois árvores de grande porte são importantes na produção de oxigênio e demoram décadas, até séculos, para atingir a maturidade plena (DESPOMMIER, 2011, 2015; LUCENA, 2014).

De acordo com Gianezini et al. (2016), cerca de 800 milhões de hectares da superfície terrestre é utilizada para atividades agrícolas, o que equivale a 38% da face continental do planeta. Deve-se levar em consideração que nem toda a superfície continental é adequada ao plantio, como desertos e locais com presença de neve durante grande parte do ano.

A Pegada Ecológica é uma forma de medir a quantidade de terra e água (em termos de hectares globais – gha) que seriam necessárias para sustentar o consumo atual da população, considerando cinco tipos de superfície: áreas cultivadas, pastagens, florestas, áreas de pesca e áreas edificadas (MADURO-ABREU et al., 2009). Segundo a *Global Footprint Network* (WWF, 2010), o planeta possui aproximadamente 13,4 bilhões de hectares globais de terra e água biologicamente produtivas e a Pegada Ecológica atingiu a marca de 2,7 gha por pessoa. Fazendo uma análise com a população atual de 7,7 bilhões de habitantes, significa dizer que para sustentar a população mundial, seriam necessários 20,79 bilhões de gha - 1,5 vezes a área que o planeta possui (WORLDOMETERS, [s.d.]).

Se assim for, a Fazenda Vertical é pensada para ajudar a minimizar esses problemas. Ela é definida como um modelo de produção agrícola dentro de edifícios (GIANEZINI et al., 2016), verticalizado e com ambiente controlado (DESPOMMIER, 2011). Segundo Schlussler (2010), os modelos atuais de Fazenda Vertical - quanto à tecnologia - surgiram em resposta ao uso inadequado de jardins no terraço de alguns edifícios no sul da Itália, no início da década de 90. Nesse caso, os fatores motivacionais para a produção se baseavam apenas na proteção às intempéries climáticas, que faziam oscilar as ofertas de frutas, legumes e verduras, provocando a alta no preço dos alimentos.

Despommier (2011) afirma que, comparado à agricultura horizontal, a Fazenda Vertical pode propiciar cerca da metade do tempo do ciclo produtivo dos cultivos, maximizar a produção no espaço físico, propiciar a ausência do uso de defensivos agrícolas e possibilitar que o produto saia pronto para o cliente final (consumidor), com baixo custo de transporte.

Com a implantação de alguns protótipos de Fazendas Verticais, no Canadá e na China, por exemplo, também surgiu o problema do custo de operação do sistema. Nesta direção, as pesquisas de Banerjee (2014) e Lucena (2014) advertiram que, dentre os gastos operacionais, o de consumo de energia elétrica está entre os mais altos. Ambos autores colocam que o alto consumo energético, ocasionado pelo uso de iluminação artificial, de bombeamento hidráulico e de resfriamento/aquecimento, está dificultando a implantação desse modelo de produção agrícola. Diante de tais desafios, entende-se que cabe aos técnicos da construção civil e da engenharia tecnológica propor soluções que subtraíam custos para que edifícios de produção agrícola tomem lugar e sejam responsáveis por um novo modo de produção alimentar. Esse pode ser um passo importante e inovador para a humanidade, com vistas à sustentabilidade urbana (DESPOMMIER, 2009; LUCENA, 2014).

Em países que possuem incidência solar durante todo o ano, como o Brasil, a energia solar, renovável, captada por painéis fotovoltaicos, pode ser altamente viável e recomendável.

De forma combinada, o uso de LEDs (Diodo Emissor de Luz) é capaz de simular a iluminação natural necessária ao desenvolvimento das espécies cultiváveis, podendo ter como fonte de alimentação um sistema de energia fotovoltaica (BRYLD, 2003). Em Suwan, na Coreia do Sul, existe uma Fazenda Vertical, com área de aproximadamente 450 m<sup>2</sup>, que elimina 50% do custo de sua energia ao adotar o uso de energias renováveis (BANERJEE, 2014).

Do ponto de vista tecnológico, as Fazendas Verticais têm a possibilidade de funcionar somente com o uso de energias não renováveis. O problema é que o custo final do produto será potencialmente maior quando comparado ao mesmo produto cultivado na agricultura convencional, afastando o interesse de investidores (BENIS et al., 2017; LUCENA, 2014). Nesse enfoque, criou-se a hipótese a ser discutida nesse trabalho, traduzida como a problemática central da pesquisa: “As Fazendas Verticais, no contexto urbano e bioclimático do município de Campo Grande/MS, podem se tornar economicamente viáveis, com o uso da energia solar fotovoltaica, em modelos convencionais de galpão industrial?”

Assim, uma possível solução que pode auxiliar no abastecimento de alimentos agrícolas, em abundância e de forma mais sustentável, pode ser a Fazenda Vertical, pois a população tende a se multiplicar nas próximas décadas. Resta compreender o potencial que as tecnologias atuais têm para tornar mais eficiente a produção agrícola vertical dentro de edifícios.

Salienta-se que esse assunto não trata apenas do uso da energia solar fotovoltaica, mas também faz uma análise sobre a necessária conservação de recursos do planeta para as próximas gerações, que dependem de novos modelos de agricultura. Dessa forma, haverá mercado para profissionais e pesquisadores qualificados e, provavelmente, nas próximas décadas, gerará uma revolução tecnológica e cultural na área de ambiental e de alimentos, de igual ou maior impacto que a Revolução Industrial (LUCENA, 2014).

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Avaliar o uso da energia solar fotovoltaica na operação de Fazendas Verticais, em galpões convencionais, para o contexto bioclimático urbano de Campo Grande/MS.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Projetar galpões de Fazenda Vertical, com três diferentes áreas, e simular os seus consumos energéticos, para a produção de alface hidropônico, no contexto bioclimático ao qual pertence o município de Campo Grande/MS;
- Quantificar o consumo energético para o funcionamento de Fazenda Vertical, nos três diferentes tamanhos de galpão industrial projetados;
- Quantificar a capacidade de geração de energia elétrica, através de painéis fotovoltaicos, instalados na cobertura dos galpões projetados, no bioclima onde está localizado o município de Campo Grande/MS;
- Estimar o percentual de redução do consumo total de energia elétrica que o sistema de energia fotovoltaica *on grid*, instalado na cobertura dos galpões, poderá propiciar para o funcionamento da Fazenda Vertical.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Como mencionado, a fome assola uma significativa área do planeta e, mesmo nas nações que possuem índices de desnutrição aceitáveis, existe a preocupação com o problema da Insegurança Alimentar e Nutricional (LUCENA, 2014).

O sustento do consumo exige o aumento de produção. As tecnologias podem auxiliar até certo ponto, mas é comum a agricultura e a criação de animais adentrarem ecossistemas fechados, destruindo biomas. No entanto, mesmo com a expansão da agricultura, foi constatado que, dentro de alguns anos, os alimentos produzidos poderão ser insuficientes para suprir as necessidades da população (DESPOMMIER, 2011, 2015; LUCENA, 2014).

Assim, há a necessidade de encontrar alternativas que busquem maximizar a produção de alimentos sem prejudicar o meio ambiente. Despommier (2009) acredita que a Fazenda Vertical pode trazer benefícios que, potencialmente, minimizariam esses problemas. O mesmo autor defende que a implantação desse modelo de produção alimentícia permite que a área de cultivo seja multiplicada verticalmente, com menor impacto ambiental.

Contudo, conforme apontado por Banerjee (2014) e Lucena (2014), o impasse é o custo de produção. Na Fazenda Vertical o consumo energético é elevado, pois existem processos que demandam horas diárias de iluminação, irrigação e climatização. Na biblioteca científica

existem poucos trabalhos que tratam sobre a redução dos custos energéticos de uma Fazenda Vertical, isso porque o tema é recente.

É baseado nessas informações que se justifica a importância de se realizar pesquisas relacionadas ao uso de energias alternativas/renováveis na operação de Fazendas Verticais. É oportuno e necessário viabilizar economicamente esse modelo de produção para que problemas futuros de Insegurança Alimentar e Nutricional sejam evitados.



## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

O aumento populacional, frente à escassez de terras disponíveis ao cultivo agrícola e os efeitos das mudanças climáticas no solo, torna preocupante a garantia da Segurança Alimentar e Nutricional (SAN) para as próximas gerações. Esta problemática tem chamado a atenção de pesquisadores nos últimos 10 anos, que disponibilizaram uma possível solução ao impasse, a Fazenda Vertical, que pode ser capaz de unificar os conceitos de agricultura urbana, cultivo em ambiente controlado, agricultura vertical, dentre outros, em um único e reduzido espaço (BANERJEE, 2014; DESPOMMIER, 2009; GIANEZINI et al., 2016; GRAAMANS et al., 2017, 2018; LUCENA, 2014).

A Fazenda Vertical é definida como um modelo de atividade agrícola exercida dentro de edifícios (GIANEZINI et al., 2016), com cultivo verticalizado e controle parcial ou total de temperatura, iluminação e nutrição das plantas (DESPOMMIER, 2011). Tem o objetivo de maximizar a produção no menor espaço possível e proteger os cultivos das variáveis climáticas, além de anular o uso de pesticidas e herbicidas (DESPOMMIER, 2009; LUCENA, 2014).

Para a implantação de tal edifício, deve-se levar em consideração todos os aspectos de caracterização e contextualização da área envolvida, objetivando um projeto mais sustentável, com fatores econômicos, sociais e ambientais positivos. Nesse sentido, a edificação deve ser entendida dentro do contexto da cidade, envolvendo aspectos de clima, de disponibilidade de recursos naturais, de fatores energéticos e de desempenho adequado (GIANEZINI et. al, 2016).

Para melhor contextualizar o tema da Fazenda Vertical e seu consumo energético, esse texto será dividido em sete partes: 1) histórico da Fazenda Vertical, 2) o abastecimento agrícola nas cidades, 3) agravos da agricultura extensiva, 4) o consumo dos recursos, 5) necessidades da cultura vegetal, 6) soluções energéticas e 7) estudos de viabilidade econômica em Fazendas Verticais.

### **2.1 HISTÓRICO DA FAZENDA VERTICAL**

Segundo Schlusser (2010), o novo modelo de Fazendas Verticais surgiu em resposta ao modelo inadequado de jardins no terraço de alguns edifícios no sul da Itália, no início da década de 1990. Para o autor, os fatores motivacionais para a produção se baseavam apenas na proteção às intempéries climáticas, que faziam oscilar as ofertas de frutas, legumes e verduras, provocando a alta no preço dos alimentos.

Porém, de acordo com Dal Sasso e Caliandro (2010), o cultivo vertical é mais antigo. No período da Revolução Industrial, a maioria das famílias rurais europeias que se deslocaram para

o meio urbano eram colonos que possuíam forte ligação com a terra. Inúmeros edifícios serviram muito mais do que moradia, foram também uma extensão das atividades de agricultura familiar. Era comum os edifícios possuírem pequenas hortas individuais ou coletivas em seus terraços, ou até mesmo a criação de pequenos animais para consumo próprio. Porém, com os conflitos geopolíticos, principalmente as duas Guerras Mundiais, as cidades europeias ficaram em ruínas. Assim, a cultura de plantio e criação de animais no meio urbano se perdeu.

A ideia de utilizar edifícios para cultivar produtos agrícolas como atividade econômica partiu de um planejamento realizado pelo geólogo norte-americano Gilbert Ellis Bailey, em 1915. Ele observou que a agricultura vertical permite que a colheita aconteça de forma intensiva, com maior área de plantio num menor espaço, assegurando colheitas mais lucrativas (BAILEY, 1915).

De acordo com os ensinamentos do arquiteto malásio Yeang (2008), foi durante a década de 1970 e início dos anos 1980 que as ideias de Bailey foram levadas para dentro do *design* arquitetônico. Yeang acreditava que toda atividade humana, incluindo a maneira que os produtos agrícolas eram cultivados, deveria se basear na crença de que todos os ambientes humanos construídos deveriam imitar as características, padrões, atributos e ciclos dos ecossistemas naturais. Assim, o arquiteto mencionou sobre o *ecodesign* - que tem como premissa básica o fato de a saúde humana depender do ar e da água, bem como da qualidade do solo para a produção alimentar. Relatou que a sobrevivência da humanidade depende da qualidade do ambiente natural e da capacidade que o planeta tem de ofertar condições para que as atividades humanas possam ser realizadas, incluindo a manutenção dos ambientes construídos.

Yeang (2008) acreditava que o *ecodesign* procurava alcançar uma integração entre o ambiente construído e seu entorno natural. Dessa forma, o arquiteto enfatizou em sua obra que criar edifícios reciclados ou eficientes em termos energéticos é insuficiente para os termos do *ecodesign* e da sustentabilidade. O necessário é a completa integração do ambiente construído com a paisagem e os ecossistemas circundantes.

A visão de Yeang sobre a agricultura vertical enfatizava a natureza pessoal e comunitária da agricultura. Ele imaginou Fazendas Verticais como sendo mais eficazes em ambientes urbanos localizados, sendo um sistema complementar à agricultura convencional no meio rural, uma vez que na Fazenda Vertical a produção em massa de certas culturas que exigem muita demanda - como soja e milho - não é viável.

## 2.2 O ABASTECIMENTO AGRÍCOLA NAS CIDADES

A recente conscientização de que os recursos do planeta são limitados irá gerar uma verdadeira revolução e o incremento de novas alternativas de produção agrícola poderá ser necessário dentro de alguns anos. Se concretizada, a estimativa populacional para o ano de 2050 (9,8 bilhões de habitantes) implicará em aumentar a produção de alimentos em 60% com relação ao que se produz atualmente (ALEXANDRATOS; BRUINSMA, 2012b; GREEN et al., 2005; TILMAN et al., 2002; UNITED NATIONS NEWS CENTRE, 2017).

Espera-se, ainda, que o número de pessoas vivendo em áreas urbanas suba para mais de 6 bilhões. Nos países em desenvolvimento a estimativa é de que a urbanização chegue a 90%. No Brasil, onde 86,6% da população vive em áreas urbanas, a previsão é de 92,4%. A preocupação se dá no fato de que não existe a quantidade de terra disponível ao plantio para alimentar toda essa população, havendo o risco da Insegurança Alimentar e Nutricional (UNITED NATIONS, 2018).

Para Mougeot (2000), levar a atividade agrícola para dentro das urbes pode ser uma boa alternativa. A agricultura urbana, em um contexto amplo, inclui o cultivo, o manejo e a distribuição de alimentos dentro da cidade, podendo ser um importante auxílio na demanda de alimentos e na tentativa de diminuir as perdas por transporte.

Em grande parte, a agricultura depende do clima, especialmente no caso de frutas e hortaliças. Socioeconomicamente falando, tal condição torna a população agrícola desempregada por boa parte do ano. Segundo Hansen e Donohoe (2003), enquanto nos países industrializados os preços mais altos dos alimentos, a maior acessibilidade e os subsídios governamentais aliviam esse problema, nos países em desenvolvimento - onde a agricultura de subsistência é a norma e o produto é vendido a preços baixos - isso se traduz em pobreza e vulnerabilidade para os trabalhadores.

Isso, somado às poucas opções de trabalho que o ambiente rural oferece, culmina na migração populacional para o meio urbano, processo que vem ocorrendo desde a Revolução Industrial, criando outro problema: a exclusão social.

O sistema econômico-social da cidade acaba excluindo grande parte da população devido às situações contrastantes características das diversas classes sociais, só sobrevivem nas cidades aqueles que podem pagar pelo alto custo da sobrevivência (SANTOS, 2009). Portanto, se a demanda de alimentos for maior que a produção o valor dos produtos tende a subir. Assim, certamente a alimentação das famílias mais pobres será afetada.

Abbassian (2011), economista e especialista em alimentos da UNFAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*), sugeriu que a tendência atual e persistente de diminuir a oferta de alimentos, o aumento dos preços e a queda na capacidade de produção têm um impacto desproporcionalmente pesado sobre os países pobres e as famílias urbanas que vivem à margem da sociedade. Ele observou que essas tendências são de grande preocupação, especialmente para países de baixa renda *per capita*, com *déficit* alimentar. Esses países podem enfrentar problemas no financiamento de importações de alimentos, o que pode levar as famílias mais pobres a gastarem uma grande parte de sua renda com alimentos. Estudos relatam que famílias urbanas pobres gastam até 80% de sua renda com a alimentação (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2011; FAO, 2012).

O Estatuto da Cidade, em seu artigo segundo, garante que é dever do Estado a adoção de padrões de produção, consumo de bens, serviços e de expansão urbana compatíveis com os limites da sustentabilidade do município e do território sob sua área de influência (BRASIL, 2001). Nesse artigo se encontra a fundamentação de que a taxa de urbanização só pode evoluir, dentre outros, se houver a garantia do direito a uma vida digna para cada cidadão. Analisando essas informações, dificilmente acontece a garantia plena desse direito quando o custo dos alimentos é alto.

Em sua interpretação, o Estatuto da Cidade permite a isenção do IPTU (Imposto Predial e Territorial Urbano) para imóveis destinados à exploração vegetal, agrícola, pecuária ou agroindustrial, mesmo quando situados em zona urbana (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2014). Porém, a agricultura convencional inserida nas urbes pode não ser capaz de amenizar o problema da Insegurança Alimentar e Nutricional. A especulação imobiliária tornou muito alto o preço da terra urbana. Vista como uma atividade econômica, a agricultura convencional dificilmente será capaz de se sustentar nesse meio. Além disso, Despommier (2011) afirma que a criação de culturas em lotes urbanos abandonados traz sérios problemas quando associados a solos contaminados e a metais pesados.

Uma alternativa que pode se tornar viável para sanar esses problemas é o cultivo agrícola verticalizado. Uma Fazenda Vertical, equivalente a um edifício de 30 andares (aproximadamente 288 mil metros quadrados), poderia fornecer alimentos para atender às necessidades de 10.000 pessoas (2.000 calorias/dia/pessoa), empregando tecnologias atualmente disponíveis (DESPOMMIER, 2010). A produção verticalizada em ambiente controlado pode ser incrementada entre 129% e 200%, quando comparada ao sistema convencional de cultivo, aumentando o lucro entre 3,60 e 5,50 dólares norte-americano por metro quadrado (LIU et al., 2005).

Existem alguns modelos de agricultura vertical, os quais incluem o uso de: a) “colunas verticais” (LINSLEY-NOAKES et al., 2006), b) “bolsas de crescimento suspensas verticalmente” (NEOCLEOUS et al., 2010), c) “sistemas de bandejas com deslocamento automático ou manual” (MAHDAVI et al., 2012) e d) projetos com “estruturas aramadas e abordagem de fábrica” (HAYDEN, 2006; KATO et al., 2010), como ilustra a Figura 1.

**Figura 1** - Modelos de agricultura vertical *indoor*.



**a)** Modelo de agricultura vertical com o uso de colunas verticais (Fonte: Martino, 2014); **b)** Modelo de agricultura vertical com bolsas suspensas verticalmente (Fonte: Minigarden, [s.d.]); **c)** Modelo de agricultura vertical com sistema de bandejas com deslocamento vertical mecânico (Fonte: Sky Greens, [s.d.]); **d)** Modelo de agricultura vertical com estrutura aramada e com abordagem de fábrica (Fonte: Gottens, 2018).

Touliatos et al. (2016) realizaram um experimento em sala ambientalmente controlada feito com o objetivo de comparar o modelo de produção em “colunas verticais” com o de “estruturas aramadas com abordagem de fábrica”. Esses pesquisadores demonstraram que o primeiro sistema produziu 13,8 vezes mais que o segundo, por metro quadrado. Porém, o peso das plantas cultivadas na “coluna vertical” não foi uniforme, prejudicando a qualidade do cultivo. Já nas plantas cultivadas no sistema de “estruturas aramadas com abordagem de fábrica” não ocorreu esse problema. Segundo os pesquisadores, isso ocorreu pelo fato de que a iluminação artificial no sistema de “colunas verticais” atua de maneira não uniforme.

De acordo com Gianezini et al. (2016), a concepção das Fazendas Verticais, além de exibir uma considerável adaptação estética aos centros urbanos, configura-se em uma alternativa mais sustentável, com baixo impacto ambiental e conveniência na disponibilidade local de alimentos. O problema é que ainda não é possível obter conclusões definitivas acerca de sua viabilidade econômica, pois são poucas as publicações específicas sobre essa temática. A agricultura vertical é recente e seus desdobramentos são complexos. Sua compreensão mais aprofundada requer conhecimentos de diversas áreas, tais como hidrobiologia, engenharia, microbiologia industrial, genética animal, botânica, arquitetura, saúde pública, gerenciamento de lixo, física, e planejamento urbano.

### **2.3 AGRAVES DA AGRICULTURA EXTENSIVA**

Despommier (2011) afirma que, na tentativa de aumentar a produção e garantir a SAN, as áreas de cultivo estão adentrando e destruindo ecossistemas. Florestas têm sido devastadas, agrotóxicos estão poluindo solos e rios, espécies vegetais e animais acabam entrando em extinção por terem seus *habitats* invadidos.

Para Walsh (2009), houve uma substancial melhoria no rendimento das colheitas e na produção de alimentos entre 1950 e 1980, em todo o mundo. Embora fosse um desenvolvimento encorajador para o problema da fome global, tornou-se um fantasma provisório resultante da dependência insustentável de fertilizantes químicos, dos monocultivos de alta intensidade, do bombeamento de reservas subterrâneas de aquífero para irrigação de lavouras e das práticas agrícolas altamente mecanizadas.

Muitos aspectos comprovam a insustentabilidade das atuais formas de produção e comércio de alimentos, onde o modelo agrícola industrial dominante, operado em grande escala, compromete a produtividade natural e cíclica do solo, contribuindo para sua deterioração e reduzindo a sua fertilidade (VILJOEN; HOWE, 2012). Além disso, apesar da tendência crescente de produção de alimentos orgânicos, os alimentos supridos globalmente à população estão cada vez mais contaminados com substâncias tóxicas (DESPOMMIER, 2011, 2015).

Com a degradação e a perda de fertilidade do solo, também devido às mudanças climáticas, terras que são propícias ao cultivo agrícola vêm se tornando, cada vez mais, um recurso escasso, além de ser uma ameaça para toda a biodiversidade do planeta (CHAPLIN-KRAMER et al., 2015; FOLEY et al., 2011; LAMBIN et al., 2013). As atuais práticas agrícolas, que são dependentes de combustíveis fósseis e de agroquímicos, contribuem para o esgotamento e a erosão do solo, a contaminação e o escoamento da água, o aumento de zonas

ecológicas mortas, a emissão de gases de efeito estufa e o aquecimento global (MACIAS, 2008; WALSH, 2009).

Despommier (2015) ressalta que existe uma ligação direta entre as mudanças climáticas e o uso de combustíveis fósseis em favor do aumento de áreas cultiváveis. Em países industrializados, até 20% dos combustíveis fósseis são queimados nos processos que envolvem a agricultura convencional. Além disso, Despommier (2011) inclui nessa soma a problemática dos desmatamentos, que acaba por prejudicar a qualidade do ar, ainda mais que árvores de grande porte são importantes na produção de oxigênio e demoram décadas, até séculos, para atingir a maturidade plena. As mudanças climáticas podem contaminar o solo, ou mesmo alterar suas propriedades, impossibilitando a atividade agrícola.

Segundo Cho (2011), quase 70% das reservas de água doce do mundo são usadas para agricultura. Mais de 80% do solo cultivável está sendo utilizado para o cultivo, o que equivale a um número próximo a 38% da superfície terrestre (BESTHORN, 2013; GIANEZINI et al., 2016).

Muller et al. (2017) apontam que nos países economicamente mais desenvolvidos, a agricultura é um setor de produção industrializado, longe de ser natural. Tal modelo de produção alimentícia se reflete nas enormes instalações de produção de hortaliças baseadas em estufas, na produção industrial de frango em grandes edifícios, no uso de agroquímicos para melhorar as capacidades digestivas dos animais, na importância das atividades de cultivo *indoor* em locais com clima desfavorável, ou nos processos industriais envolvidos na confecção do produto final.

No trabalho realizado em estufas, quando foi feito o manuseio da terra, este contribuiu com 61% na emissão de gases por tal atividade, nos Estados Unidos (TAKLE; HOFSTRAND, 2008). Logo, o cultivo dentro de edifícios, sem o uso da terra, acabou sendo uma opção mais sustentável.

Um fator a ser considerado na concepção de um modelo de agricultura é a Análise do Ciclo de Vida (ACV). Al-Chalabi (2015) fez uma pesquisa para comparar a ACV da produção de alface em Fazendas Verticais e na forma convencional de plantio, num clima típico do Reino Unido. Ele levou em consideração as etapas de propagação do cultivo, fertilização, irrigação, colheita, aquecimento e iluminação. Os resultados demonstraram que, no período do verão, a produção vertical de alface emitiu cinco vezes mais CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) que a produção

convencional. Já no inverno, a Fazenda Vertical emitiu pouco mais que duas vezes a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida pela produção horizontal em terra.

A ACV, que é regulamentada pelas normas ISO 14040/1997 até 14043/2000, está no centro de uma abordagem sistêmica, com a finalidade de tornar uma empresa ecologicamente correta. Isto se dá por meio da eficiência energética e otimização das matérias-primas utilizadas, ao longo da vida útil do produto (PRATES, 1998).

Segundo Muller et al. (2017), as soluções agrícolas de alta tecnologia - sem o uso do solo - dificilmente serão uma boa opção quando a terra não é um recurso escasso, ou quando o capital financeiro não for abundante. No entanto, esse modelo de produção pode ser promissor para a proteção do solo, porque faz uso mínimo desse recurso, reduzindo a sua demanda para a produção agrícola e poupando seu uso em outros lugares/atividades.

O caminho para o desenvolvimento mais sustentável requer um sistema de produção que preserve a base ecológica do desenvolvimento. A produção agrícola e a preservação ambiental devem estar aliadas, com uso de tecnologia adaptada e preferencialmente local, reduzindo o uso de produtos químicos prejudiciais à saúde (LUCENA, 2014).

De acordo com Despommier (2011), haverá - dentro de poucos anos - a necessidade de se adotar novos modelos de produção agrícola, de forma a direcionar a atividade à SAN, não somente quanto à quantidade, mas quanto à qualidade também, reprimindo a proliferação de doenças alimentares.

Neste sentido, Despommier (2011;2015) postula que a Fazenda Vertical se torna uma boa alternativa de produção agrícola no meio urbano, pois as tecnologias de eficiência energética e os edifícios urbanos abandonados são propícios ao uso para a agricultura vertical. Por sua vez, a Fazenda Vertical pode ser uma solução para os problemas de desmatamento e mudanças climáticas no que diz respeito ao uso da terra para atividades agrícolas, visto que o crescimento populacional demandará mais produção de alimentos nas próximas décadas.

## **2.4 O CONSUMO DOS RECURSOS**

Com a implantação de alguns modelos de Fazendas Verticais - como o de Singapura (China) e o de Vancouver (Canadá) - o problema do custo de operação do sistema emergiu. Nos cálculos de Banerjee (2014) e de Lucena (2014), dentre os gastos operacionais, o de consumo de energia elétrica estava entre os mais altos.

Nesse sentido, Benis et al. (2017) fizeram simulações para quantificar os impactos ambientais, o uso da água e o uso de energia em diferentes formas de produção no contexto

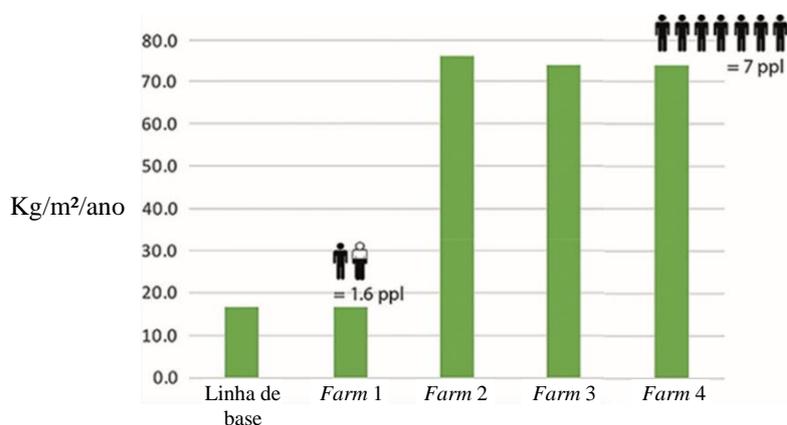
urbano de Lisboa, em Portugal. Para isso, tomaram a produção rural convencional de tomate como linha de base e adotaram outras quatro situações, também com a produção de tomate, como mostra o Quadro 1.

**Quadro 1** - Simulação de produção agrícola de tomate em Lisboa, Portugal.

<i>FARM 1</i>	<i>FARM 2</i>	<i>FARM 3</i>	<i>FARM 4</i>
a) Produção convencional em terraço de edifício, com uso de terra;	a) Produção agrícola verticalizada implantada no terraço de um edifício com vedação transparente, em policarbonato;	a) Produção agrícola verticalizada instalada no interior de um edifício abandonado, no último piso, com janelas nas fachadas norte e sul e iluminação zenital;	a) Produção agrícola verticalizada instalada em um armazém sem penetração de luz ou ventilação natural (controle total do ambiente);
b) Uso de água com irrigação convencional: 40 litros/kg de tomate;	b) Uso de sistema hidropônico com bombeamento mecânico;	b) Uso de sistema hidropônico com bombeamento mecânico;	b) Uso de sistema hidropônico com bombeamento mecânico;
c) Cultivo durante nove meses no ano.	c) Sistema de iluminação misto (natural e artificial);	c) Sistema de iluminação misto (natural e artificial);	c) Apenas uso de iluminação artificial;
	d) Sistema de ventilação híbrido (natural e mecânico);	d) Sistema de ventilação híbrido (natural e mecânico);	d) Sistema mecânico de ventilação;
	e) Cultivo durante todo o ano.	e) Cultivo durante todo o ano.	e) Cultivo durante todo o ano.

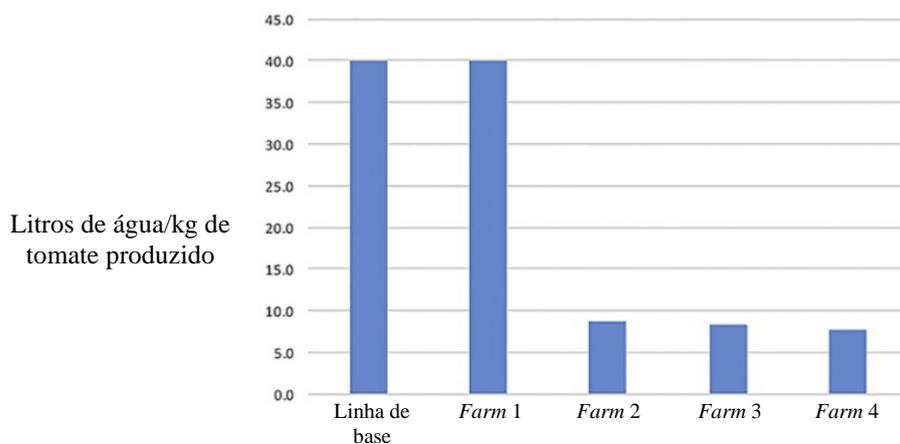
Fonte: Adaptado de Benis et al. (2017).

Na pesquisa, observou-se que a produção de tomate em ambientes fechados (*Farms 2, 3 e 4*) foi mais de quatro vezes maior do que a produção em locais abertos (*Farm 1* e linha de base), isso porque o clima de Lisboa permite o cultivo convencional por apenas nove meses no ano (Figura 2). Em locais enclausurados, o mau clima não interfere na produção.

**Figura 2** - Produção anual de tomate por m<sup>2</sup> em diferentes modelos de produção (Lisboa/Pt).

Fonte: Adaptado de Benis et al. (2017).

Com relação ao uso da água, Benis et al. (2017) constataram que os modelos com sistema hidropônico<sup>1</sup> (*Farms* 2, 3 e 4) tiveram os melhores resultados devido ao reuso desse recurso e a ausência de terra (Figura 3). O consumo de água para esses modelos reduziu, em média, 80% quando comparado à *Farm* da linha de base e à *Farm* 1 (irrigação convencional).

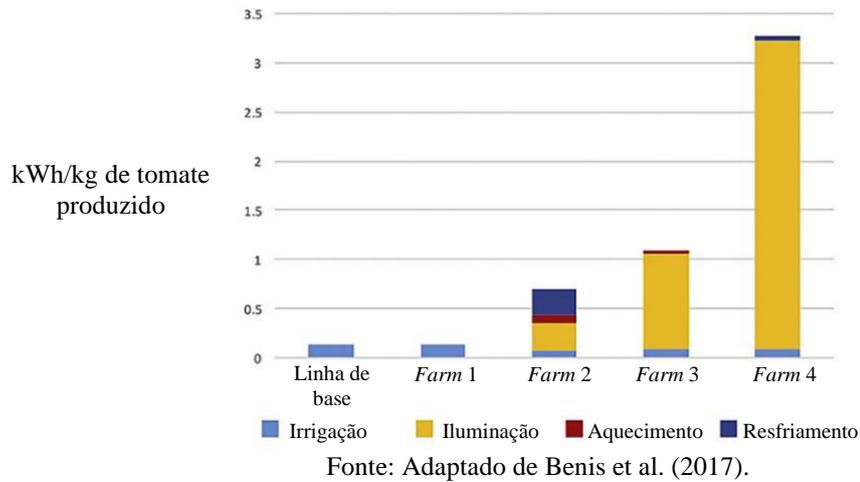
**Figura 3** - Consumo de água por Kg de tomate produzido em diferentes modelos de produção.

Fonte: Adaptado de Benis et al. (2017).

Já observando o consumo de energia elétrica, Benis et al. (2017) identificaram que quanto mais fechado for o sistema de produção, maior será a necessidade de iluminação artificial e de aquecer ou resfriar o ambiente (Figura 4). Por mais que o sistema de hidroponia seja mecanizado, os resultados apontaram para um menor consumo de energia do que o necessário na irrigação convencional.

<sup>1</sup> Segundo Lucena (2014), a hidroponia é um sistema em que as plantas são cultivadas em água contendo nutrientes enriquecidos com sais minerais, em espaços pequenos.

**Figura 4** - Consumo de energia elétrica/Kg de tomate produzido em diferentes modelos de produção.



Quanto à emissão de CO<sub>2</sub>, Benis et al. (2017) verificaram que o uso de água nos modelos de irrigação convencional (linha de base e *Farm 1*), causou maior impacto, por estar associado à maior quantidade utilizada desse recurso. Os efeitos do gás com relação ao uso da eletricidade apareceram em maior escala nos ambientes mais fechados (*Farms 2, 3 e 4*), também devido ao seu maior uso. No caso das emissões por transporte, as fazendas urbanas apresentaram a vantagem de estar muito próximas do consumidor final, diminuindo a perda de produtos e a emissão de gases causadores do efeito estufa.

Tsitsimpelis et al. (2016) fizeram uma avaliação da eficiência energética de um protótipo de Fazenda Vertical, com sistema de bandejas mecânicas automáticas em um *container* (Figura 5), avaliando iluminação, irrigação, climatização e locomoção das bandejas.

**Figura 5** - Protótipo de Fazenda Vertical em *container*.



Fonte: Tsitsimpelis et al. (2016).

Quanto à iluminação, os pesquisadores chegaram à conclusão de que a produção em menor tempo compensa o custo energético do uso de LEDs. Eles relataram que na aplicação de

um fotoperíodo<sup>2</sup> diurno de 16 horas foi possível economizar entre 29 e 139 kWh/dia. O movimento mecânico das bandejas auxiliou a controlar as diferenças de temperatura e umidade entre prateleiras, já que o condicionador de ar e o exaustor sozinhos não foram capazes de fazer isso com eficiência. Tsitsimpelis et al. (2016) chamaram a atenção para a necessidade de mais pesquisas, com o fim de melhorar a eficiência energética na agricultura vertical, em ambiente controlado, e a qualidade dos cultivos.

Para Oliveira (2006), a eficiência energética visa aperfeiçoar a utilização da energia elétrica através de orientações, ações e controles sobre recursos humanos e materiais. Procura-se a redução dos índices globais e específicos da quantidade de energia elétrica necessária para a obtenção do mesmo resultado.

Bayley et al. (2011) fizeram uma análise comparativa entre o consumo energético de um projeto piloto de Fazenda Vertical europeu (Figura 6) e o consumo de uma produção rural horizontal com ambiente controlado de mesma área. Como resultado, para a produção horizontal, o consumo foi de 2 kWh/planta. Já na produção vertical com 3 metros de altura, o consumo foi de 0,5 kWh/planta. Para uma Fazenda Vertical, com 6 metros de altura, o consumo energético diminuiu para 0,25 kWh/planta.

**Figura 6** - Projeto europeu de Fazenda Vertical com sistema de bandejas manuais.



Fonte: Bayley et al. (2011).

Em Chicago, Estados Unidos, Chance et al. (2014) desenvolveram um estudo com entrevistas a inquilinos do *The Plant*, um tipo de shopping de agricultura urbana, em um ambiente controlado. O objetivo foi coletar informações sobre o consumo energético em todo o processo do edifício – além da atividade agrícola existia padaria, processamento de bebidas e queijo, e também contava com atividades educacionais. Esses pesquisadores concluíram que culturas agrícolas de produção extensiva, como milho e trigo, dificilmente ganharão espaço em

---

<sup>2</sup> Fotoperíodo: tempo em que as plantas recebem iluminação.

modelos de atividade agrícola com ambiente controlado. Mas, segundo os mesmos autores, tornou-se altamente viável o cultivo hortaliças, por exemplo, dentro de Fazendas Verticais.

O consumo energético dos modelos de produção agrícola depende de algumas variáveis, dentre as quais se destacam: bioclima local, cultura vegetal, sistema de irrigação e arquitetura edilícia (BENIS et al., 2017). O estudo dessas variáveis pode auxiliar na diminuição dos custos operacionais da Fazenda Vertical.

Enquanto alguns criticam a agricultura vertical como um sonho utópico com aplicações práticas limitadas e dificuldades técnicas (KRETSCHMER; KOLLENBERG, 2011), vários países ao redor do mundo - incluindo Coréia do Sul, Japão, China, Cingapura, Itália, Holanda, Inglaterra, Jordânia, Arábia Saudita, Emirados Árabes Unidos e Canadá - estão avançando no desenvolvimento de projetos agrícolas verticais (CHO, 2011).

De acordo com Max (2011), nos EUA, estavam em andamento planos para desenvolver Fazendas Verticais em Chicago, Newark, Seattle, Milwaukee, Nova York, Jackson e Wyoming. Em Den Bosch, na Holanda, uma Fazenda Vertical subterrânea, de três andares, opera usando tecnologia LED altamente avançada com monitoramento rigoroso de todos os aspectos do ciclo de crescimento de alimentos. O projeto Den Bosch cultivou vários tipos de culturas agrícolas, incluindo feijão, milho, pepino, tomate e morango. Ao usar 90% menos água do que uma fazenda convencional (sistema aeropônico<sup>3</sup>), a Fazenda Vertical de Den Bosch conseguiu atingir rendimentos quase três vezes maiores do que o sistema de produção médio baseado no solo. Planos estavam em andamento para adicionar mais câmaras verticais às já existentes, com a expectativa de que nos próximos anos, com a capacidade aumentada, será possível fornecer frutas e vegetais frescos para toda a população de Den Bosch - cerca de 140.000 habitantes.

Besthorn (2013) trouxe relatos sobre um projeto semelhante realizado em Suwon, na Coréia do Sul. O crescente apoio do país à agricultura vertical não é apenas uma questão de interesse, mas é, de fato, uma questão de sobrevivência. O projeto Suwon abasteceu supermercados locais com alface e uma pequena seleção de frutas e vegetais. E, ao contrário da agricultura convencional, baseada no solo, o projeto Suwon não usava pesticidas ou herbicidas durante os períodos de semeadura e colheita, e toda a água era reciclada.

---

<sup>3</sup> Segundo Ritter et al. (2001), a aeroponia consiste em pulverizar os nutrientes para as plantas suspensas no ar, que ficam apoiadas pelos colos de suas raízes.

## **2.5 NECESSIDADES DA CULTURA VEGETAL**

Com os sistemas de produção sem solo, o gerente de operações pode ser mais um engenheiro do que um agricultor e, assim, seu papel mudaria completamente. Isso porque esse profissional deve possuir conhecimentos tecnológicos embasados na agricultura e na edificação, afim de propiciar os meios para o ótimo desenvolvimento dos cultivos (DESPOMMIER, 2009; LUCENA, 2014).

De acordo com Savvas e Passam (2002), para se atingir as necessidades mínimas de desenvolvimento das plantas, em ambiente controlado, alguns aspectos devem ser levados em consideração. A nutrição e as condições climáticas (especialmente temperatura e intensidade luminosa) têm um forte efeito sobre o crescimento, o rendimento e a qualidade nutricional das plantas. Logo, para melhor compreensão, esses temas serão tratados a seguir.

### **2.5.1 Hidroponia**

A hidroponia pode ser definida como uma ciência que promove o crescimento de plantas sem o uso do solo, sendo um sistema em que as plantas são cultivadas em água contendo nutrientes enriquecidos com sais minerais, em espaços pequenos e inertes (LUCENA, 2014; ROVER et al., 2016). Seu funcionamento depende de bombeamento hidráulico, de reservatório para nutrientes e de canaletas para a fixação da planta e circulação dos nutrientes.

Segundo Lopes et al. (2010), os vegetais produzidos em solução hidropônica apresentam vantagem em comparação com os produzidos em campo aberto, pois as folhas não são irrigadas, reduzindo a incidência de doenças. Ainda, a água utilizada na solução nutritiva apresenta um controle de qualidade mais simples, o que diminui a necessidade de mão-de-obra especializada.

Com base em experimento já realizado por Boaretto (2004), o ciclo da alface - do transplante à colheita - no sistema de cultivo em campo aberto demora em torno de quarenta e cinquenta dias, podendo chegar a até oitenta dias, enquanto que no sistema hidropônico o ciclo é de trinta dias, independentemente da época do ano.

Sendo o sistema de hidroponia um instrumento tecnológico, seu custo de implantação tende a ser mais elevado que o valor de investimento para a irrigação convencional. Porém, pesquisas relatam que é possível recuperar o capital investido em curto prazo. Silva e Schwonka (2001), em análise econômica de um projeto de produção de alface, concluíram que em trinta meses já seria possível recuperar o investimento inicial. Isso se deve à boa lucratividade que esse sistema demonstrou proporcionar.

### 2.5.2 Solução nutricional

Quando se fala em qualidade nutricional, há um aspecto que faz toda a diferença no cultivo sem solo, a escolha da solução nutritiva. Ohse et al. (2001) realizaram uma pesquisa com o objetivo de determinar a composição centesimal de seis cultivares de alface (Aurora, Brisa, Lívia, Mimosa, Regina e Verônica), utilizando quatro soluções nutritivas (Ueda, Furlani, Castellane-Araújo e Bernardes). Esses pesquisadores realizaram a combinação entre os seis cultivares de alface e as quatro soluções nutritivas, comparando a qualidade do produto cultivado em meio hidropônico com a qualidade do plantio em meio convencional. A semeadura foi realizada em bandejas de poliestireno expandido de 288 células, previamente preenchidas com substrato comercial, colocando-se 1 (uma) semente por célula, cobrindo-as com uma fina camada com o mesmo substrato.

Posteriormente, as bandejas foram colocadas para flutuar sobre uma lâmina de aproximadamente cinco centímetros de solução nutritiva Castellane-Araújo diluída a 25%. Após permanecerem na piscina até atingirem de quatro a cinco folhas, e cerca de cinco centímetros de altura, as plantas foram então retiradas da bandeja, tiveram suas raízes lavadas e foram transferidas para o berçário ou bancada temporária, etapa essa de adaptação ao sistema hidropônico, que tem por objetivo desenvolver o sistema radicular, utilizando-se solução Castellane-Araújo diluída a 50%.

A circulação da solução foi realizada por um conjunto moto-bomba de 0,5 HP (372,85 W) e controlada por um temporizador, o qual manteve a circulação por 15 minutos a intervalos de 15 minutos durante o dia (das 6:00 as 18:00 horas) e durante à noite permaneceu ligado às 22:00 e 02:00 horas por 15 minutos (das 18:00 as 6:00 horas), fornecendo um volume de 2,38 litros de solução nutritiva por planta.

Como resultado, as hortaliças cultivadas em solo e em meio hidropônico não diferiram quanto ao teor de água da folha, apresentando teor médio de 94,46% aos sessenta e oito dias após a semeadura. A variação no teor de água foi consequência, provavelmente, do tempo de permanência das plantas de alface na fase final, sendo que, quanto maior esse período maior o acúmulo de massa de matéria seca e, com isso, menor o teor de água.

Os cultivares não diferiram também quanto aos teores de extrato etéreo, carboidratos totais, proteína e valor calórico, apresentando a cada 100 g comestíveis das hortaliças valores médios de 0,16 g; 1,78 g; 1,31 g e 13,79 kcal, respectivamente.

A alface hidropônica, tanto para cultivares do tipo folha lisa, quanto para os do tipo folha crespa, mantiveram qualidade nutricional semelhante à alface produzida no sistema convencional (com solo), revelando ter menor valor calórico, menor teor de extrato etéreo e carboidratos totais, com o mesmo teor de proteínas que a alface de solo.

A solução nutritiva Ueda apresentou valores muito discrepantes das demais soluções testadas, levando a alface a aumentar muito seu valor calórico, o que não é desejado em hortaliças folhosas, por serem indicadas na dieta alimentar, justamente, devido ao seu baixo valor calórico. Os cultivares estudados acumularam diferentes teores de fibra na parte aérea em função da solução nutritiva utilizada. O alto teor encontrado na solução Ueda foi consequência do alto acúmulo de massa de matéria seca, devido a sua baixa concentração de sais e ao seu crescimento reduzido.

Ohse et al. (2001) perceberam que a alface hidropônica tende a possuir maior teor de fibra que a produzida no solo devido, provavelmente, ao aumento no tamanho das folhas quando produzidas por esse sistema em estufa. Para os autores, a solução nutritiva Ueda não deve ser utilizada para a produção de alface no sistema hidropônico, por aumentar a produção de massa de matéria seca e, com isso, o valor calórico, o teor de extrato etéreo e o teor de fibras, que podem depreciar a qualidade do produto. Essa solução levou as plantas de alface a apresentarem sintomas de deficiência nutricional múltipla. A alface hidropônica é um alimento altamente saudável por manter ou melhorar sua composição centesimal quando comparada com a cultivada no solo, por ser um produto de baixo valor calórico.

### **2.5.3 Conforto térmico**

A alface é uma planta muito sensível às condições climáticas, pois a temperatura do ambiente pode influenciar potencialmente no crescimento e no desenvolvimento da planta (PANDURO, 1986). A faixa de temperatura mais adequada ao crescimento e produção da alface está entre 15 e 24 °C. O melhor desenvolvimento tem sido observado em temperaturas oscilando entre 15 e 20 °C (BRUNINI et al., 1976; MAYNARD; HOCHMUTH, 2007).

Segundo Sganzerla (1990), a temperatura máxima tolerável pela cultura da alface está em torno de 30 °C, e a mínima por volta dos 6 °C. O aumento de temperatura acima dos 40 °C retarda a absorção de nutrientes, enquanto que a maior absorção é possível entre 25 e 35 °C. De acordo com Filgueira (1982), baixas temperaturas noturnas, inferiores a 15 °C, podem ser mais importantes em relação às diurnas.

Já quando se trata da temperatura no sistema hidropônico de cultivo, Bliska (1998) e Sanchez (2007) recomendam que a temperatura da solução nutritiva (lâmina d'água) não deva ultrapassar os 30 °C, sob pena de causar danos às plantas, e que as temperaturas diurna e noturna devem ficar próximas de 16 °C e 10 °C, respectivamente, durante a época fria, e 24 °C e 15 °C, na época quente, com uma ressalva: deve ocorrer variação com a espécie e cultivar usada.

#### 2.5.4 Conforto lumínico

A iluminação artificial é responsável por aproximadamente 20% de toda a energia elétrica consumida no país, sendo cerca de 20% do consumo no setor residencial e mais de 40% da energia elétrica consumida pelo setor de comércio e serviços (ELEKTRO, 2012).

A eficiência do sistema de iluminação está relacionada à eficiência individual de um conjunto de elementos, sendo eles: lâmpadas, luminárias, reatores, utilização de luz natural, cores das superfícies internas, mobiliário e necessidades de iluminação do ambiente (ELEKTRO, 2012).

Segundo Oliveira (2017), em um projeto luminotécnico, geralmente, não se consideram a eficiência do conjunto luminária-lâmpada-reator, sendo comum a adoção de lâmpadas eficientes com luminárias ou reatores pouco eficientes, aumentando o desperdício de energia nestes casos. Para ele, é importante haver a compatibilidade entre lâmpada e reator, pois cada lâmpada possui um tipo específico de reator que garante uma característica ótima de operação e de sua vida útil.

Na agricultura, cada espécie de planta precisa de uma certa faixa de iluminação, em termos de Densidade de Fluxo de Fótons Fotossintéticos, traduzido do inglês *Photosynthetic Photon Flux Density* (PPFD). Portanto, os painéis de iluminação não podem ser operados na potência máxima, mas em diferentes níveis de potência, dependendo dos requisitos da Densidade de Fluxo de Fótons Fotossintéticos de cada espécie (BANERJEE, 2014). As plantas podem ser classificadas em cultivos de alto consumo energético (ou de dia longo) ou de baixo consumo energético (ou de dia curto), dependendo da intensidade de luz que necessitam (HASSANIEN et al., 2016).

De acordo com Yeh e Chung (2009), as lâmpadas de LED permitem o controle de sua composição espectral e do ajuste da intensidade luminosa para, assim, simular as alternâncias da intensidade luminosa natural – luz do sol - durante o dia ou noite. Dessa forma, as plantas podem realizar a fotossíntese através da iluminação artificial.

Yeh e Chung (2009) ainda afirmam que, em comparação com as lâmpadas incandescentes, que têm uma vida útil de aproximadamente 1.000 horas, e as lâmpada fluorescentes, com vida útil estimada em 8.000 horas, as lâmpadas de LED têm uma vida útil significativamente mais longa, 100.000 horas. Além da sua longa vida útil, os LEDs têm muitas vantagens em relação às demais fontes de luz artificial. Essas vantagens incluem tamanho pequeno, comprimento de onda específico, baixa potência térmica, intensidade luminosa ajustável, bem como alta eficiência na conversão fotoelétrica. Tais vantagens tornam os LEDs ideais para suportar o crescimento das plantas em ambientes controlados, como em estufas e em Fazendas Verticais.

Os estudos de Hunter e Burritt (2004) e de Li e Kubota (2009) mostraram que o aumento na intensidade luminosa, geralmente, promove o desenvolvimento da cultura vegetal. Em contradição, Kang et al. (2013) acreditam que o desenvolvimento pleno da espécie só pode acontecer dentro de uma certa faixa de intensidade de luz. Provavelmente, esse desenvolvimento vai depender das necessidades fotossintéticas de cada espécie de planta.

Koontz e Prince (1986) descobriram, através de experiência, que quando a quantidade de radiação externa (em mols de fótons) for igual à radiação do ambiente interno, as plantas sob radiação contínua (24 horas/dia) pesam de 30% a 50% mais que as plantas sob um fotoperíodo de 16 horas/dia. Por usar radiação contínua sobre a folha da alface, menos lâmpadas são necessárias, havendo certo ganho no rendimento.

Um segundo estudo, de Benis et al. (2017), afirma que as culturas reagem aos fotoperíodos (ajuste de períodos de luz e escuridão), exigindo ciclos que alternam períodos de luz e de sombra. Como não é necessária iluminação durante toda a noite, os sistemas agrícolas de ambientes controlados podem se alinhar bem com a produção de energia solar fotovoltaica, em termos de sobreposição de carga. Assim, o fotoperíodo e a qualidade luminosa (ajuste na proporção das luzes vermelha, verde e azul) possuem impactos decisivos na morfologia das plantas (YEH; CHUNG, 2009).

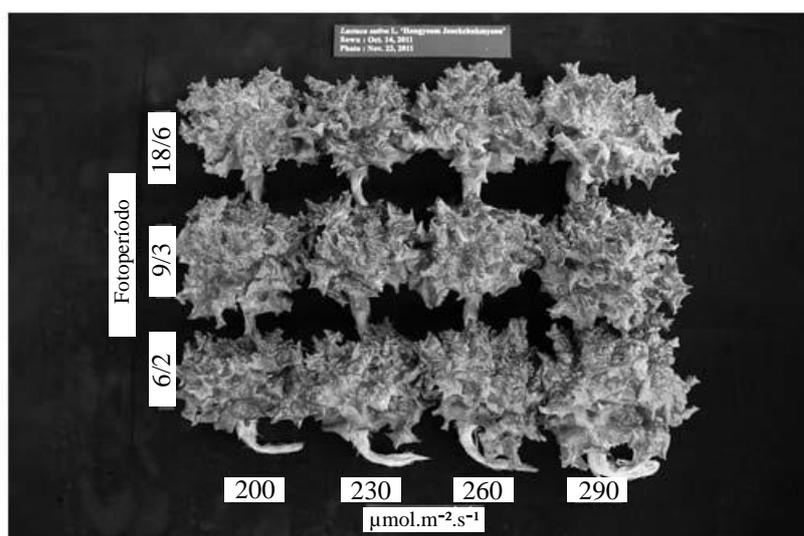
Em pesquisa realizada por Kang et al. (2013), lâmpadas de LED foram colocadas horizontalmente 20 centímetros acima da bancada de geminação da alface, dentro de um ambiente controlado. Mediu-se a PPF com um fotômetro digital em quatro diferentes níveis de radiação fornecidas por lâmpadas de LED tubular (200, 230, 260, e 290  $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ). Essas intensidades foram alternadas em três diferentes fotoperíodos: 18/6 horas (aceso/escuro), 9/3 horas (aceso/escuro) e 6/2 horas (aceso/escuro). Isso gerou doze diferentes combinações.

Para a análise dos resultados, as características de crescimento foram levadas em consideração, como a altura da planta, o comprimento da raiz, a largura e a área da folha, o

número de folhas, o valor da clorofila, a taxa fotossintética, a condutância estomática, a taxa de transpiração e a taxa de assimilação do gás carbônico.

Como ilustra a Figura 7, a altura da planta, o comprimento da raiz mais longa, o peso fresco e seco da parte aérea e da massa fresca da raiz foram observadas mais baixas no tratamento de  $200 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , com fotoperíodo 9/3. O menor peso seco da raiz foi observado no tratamento de  $260 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  com fotoperíodo 18/6. Plantas cultivadas sob a alta intensidade luminosa ( $290 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) apresentaram maiores resultados de crescimento em relação aos demais tratamentos. A altura da planta e o peso fresco da parte aérea foram os maiores no tratamento  $290 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  com fotoperíodo 9/3, e o tratamento  $290 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  com fotoperíodo 6/2 teve o maior peso seco da raiz. O tratamento  $290 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  com fotoperíodo 18/6 exibiu a maior massa fresca da raiz e o maior comprimento da raiz.

**Figura 7** - Efeito da PPFd e do fotoperíodo no desenvolvimento da alface.



Fonte: Adaptado de Kang et al. (2013).

Segundo Kang et al. (2013), esses resultados sugerem que a alta intensidade luminosa, somada a um longo fotoperíodo, tal como o de 18/6, possui efeitos mais significantes no desenvolvimento da alface, visto que com essa combinação foram observados os pesos frescos e secos mais altos (principais fatores que afetam o crescimento inicial após o transplante e a colheita).

Nesse experimento, o melhor resultado no comprimento das folhas da alface foi observado no tratamento de  $290 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , com fotoperíodo de 9/3. O menor comprimento ocorreu com a intensidade luminosa de  $200 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , com fotoperíodo de 18/6. As folhas de alface com maior área superficial foram encontradas no experimento que utilizou a

combinação de  $290 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  com fotoperíodo de 6/2, as de menor área folhear foram observadas na combinação de  $230 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , com fotoperíodo de 6/2.

Kang et al. (2013) concluíram que ao se aumentar a PPFD e alongar o fotoperíodo haverá ganhos substanciais no peso fresco, proporcionando um meio de reduzir o tempo do ciclo de produção. Assim, os melhores resultados para o crescimento de vegetais foram obtidos no tratamento sob a alta intensidade luminosa de  $290 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  com fotoperíodo de 6/2 (claro/escuro).

Yeh e Chung (2009) afirmam que, nas plantas, as moléculas de clorofila iniciam a fotossíntese quando capturam a energia luminosa e a convertem em energia química para ajudar a transformar a água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) em nutrientes primários. As moléculas de clorofila absorvem os comprimentos de onda azul e vermelho de forma mais eficiente. Os comprimentos de onda verde e amarelo são refletidos ou transmitidos e acabam não tendo importância no processo da fotossíntese. Os LEDs permitem que se elimine os comprimentos de onda da luz branca (LEDs normais), reduzindo a quantidade de energia elétrica necessária para o crescimento das plantas, que crescem normalmente, sem prejudicar a qualidade do produto.

Bula et al. (1991) mostraram que o desenvolvimento da alface com LEDs vermelhas combinadas com lâmpadas fluorescentes tubulares azuis são possíveis. Okamoto et al. (1997) investigaram os efeitos de diferentes faixas dos níveis de PPFD vermelho e azul no crescimento e na morfogênese das mudas de alface. Eles descobriram que o comprimento do caule da alface diminui significativamente com o aumento no comprimento de onda da luz azul. Essa pesquisa também identificou que o respectivo aumento acelera o alongamento do caule das mudas de alface, maximiza o peso seco total da planta e acelera o seu crescimento.

Com as pesquisas outrora realizadas chega-se ao entendimento de que as lâmpadas de LEDs são a melhor tecnologia disponível para a iluminação artificial em sistemas agrícolas de ambiente controlado. Além disso, as opções de LEDs disponíveis no mercado facilitam a escolha e o controle do que se almeja de qualidade final para o plantio (tamanho, peso, dentre outros).

## **2.6 SOLUÇÕES ENERGÉTICAS**

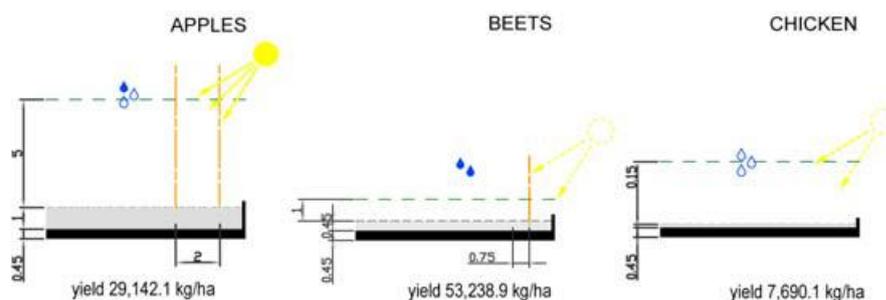
O uso consciente da energia elétrica pode ser uma estratégia para reduzir os gastos de operação de uma Fazenda Vertical. Neste cenário a gestão energética visa promover a eficiência na aquisição e consumo de energia elétrica (OLIVEIRA, 2017).

De acordo com Oliveira (2017), quanto à eficiência na aquisição de energia, no Brasil, existem os sistemas tarifários, que repassam a variação do custo de produção ao consumidor através das tarifas de consumo de energia e de demanda. Como forma de induzir o comportamento diário e semanal do uso da energia, estas tarifas foram criadas de maneira que, em horários onde ocorrem os maiores custos de geração, seu preço também seja maior. Sobre este mesmo aspecto, nos horários do dia e dias da semana onde o fator de utilização do sistema elétrico é pequeno e a demanda fornecida pela capacidade instalada é baixa as tarifas possuem preços menores, estimulando o uso da energia nestes períodos.

Quanto à eficiência no consumo de energia, é possível verificar que a edificação tem um papel fundamental para mitigar os impactos que a Fazenda Vertical pode causar, eliminando o uso exagerado de iluminação artificial e proporcionando sistemas de resfriamento/aquecimento naturais (BENIS et al., 2017).

Na região bioclimática de Nova York, Estados Unidos, Broyles (2008) realizou um projeto arquitetônico energeticamente eficiente. Ela fez um estudo para identificar quais as posições corretas das fachadas para o adequado ganho de iluminação e temperatura, com o auxílio de um diagrama solar (Figura 8). A pesquisadora chegou à conclusão de que haveria maior eficiência se as tipologias cultivadas fossem posicionadas de acordo com suas necessidades ambientais dentro do edifício. Além disso, os materiais utilizados na construção edilícia deveriam ser criteriosamente estudados. Tais esforços poderiam auxiliar no ganho ou perda de calor/iluminação, tomando por base as características climatológicas do local e as necessidades do cultivo, de forma a minimizar o consumo energético por iluminação ou climatização artificial.

Quando ainda na fase de projeto, todas as possibilidades de perdas e ganhos térmicos devem ser levadas em consideração (GRAAMANS et al., 2017). Caso isso não aconteça, a estimativa de temperatura de um determinado ambiente para as necessidades de uma dada cultura vegetal pode ser superdimensionada. Tal fato pode ocorrer por diversos motivos, sejam eles relacionados às características climáticas e/ou edilícias, até mesmo pela própria evapotranspiração dos cultivos. Segundo Graamans et al. (2017), ao utilizarem energia no processo de fotossíntese, as plantas geram calor no ambiente. Nesse caso, para as alfaces, o ganho térmico pode não ser expressivo, mas para culturas vegetais, que possuem faixas de conforto térmico mais precisas, o produto final poderá ser afetado.

**Figura 8** - Diagrama de insolação (Plantas de Corte)

Fonte: Broyles (2008).

Ainda, Despommier e Ellingsen (2008) e Matzenberger e Schipfer (2014) afirmam que as Fazendas Verticais podem gerar eletricidade através do seu próprio lixo. Pode-se fazer uso de matérias orgânicas através de um tanque de fermentação anaeróbia, que resulta na queima do biogás para geração de energia. Com a sobra do material, é possível gerar eletricidade pela queima da biomassa. O lixo pode também ser coletado pela vizinhança, aumentando o poder de geração de energia, além de contribuir para a sustentabilidade local.

Como visto, a importação de alimentos nas megacidades, que chega a atingir 80% de tudo o que é consumido, vem de grandes distâncias, o que causa a perda de alimentos e um imenso desperdício energético. A Fazenda Vertical, através da biodigestão e da queima da biomassa, pode fechar o ciclo de produção, evitando perdas e maiores taxas de poluição (DANIEL, 2014).

Gruia (2011) relata sobre a importância de se adotar as energias renováveis nos novos modelos de produção agrícola. O autor analisa as formas de implementar novas fontes de energia, na busca de encontrar soluções novas e emergentes para reduzir os custos da agricultura modular e em Fazendas Verticais.

Nesse contexto, a energia eólica pode se tornar uma ótima opção para mitigar o uso da rede elétrica. Jara (2009) afirma que para haver produção plena de energia eólica são necessários ventos de 12 m/s. Porém, segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001), para a região bioclimática em que o município de Campo Grande - no estado do Mato Grosso do Sul - está inserido (como na maior parte do território brasileiro), a média da velocidade do vento dificilmente ultrapassa 6,5 m/s, o que, segundo o Ministério de Minas e Energia, não é economicamente atrativo para a instalação de um sistema de geração de energia elétrica com fonte eólica (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2001).

### 2.6.1 A energia solar fotovoltaica na agricultura indoor

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2013), o potencial de geração fotovoltaica no Brasil foi estimado em 287 TWh/ano, sendo este número 230% do consumo elétrico residencial, considerando apenas a geração distribuída em edificações residenciais. Demonstrando, teoricamente, que a geração de energia elétrica fotovoltaica poderia suprir plenamente esta parcela da carga com excedentes (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014).

Em 2012, foi regulamentada pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) a Resolução Normativa nº 482, estabelecendo condições gerais para o acesso de micro e de minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica (*On grid*). A partir desta Resolução, foi criado o sistema de compensação, em que basicamente o consumidor ao injetar energia na rede recebe um crédito de energia, a ser consumido posteriormente (OLIVEIRA, 2017).

De acordo com a Resolução nº 687/2015 da ANEEL, que veio a alterar a Resolução nº 482, a microgeração distribuída é caracterizada pelas centrais geradoras, com potência menor ou igual a 75 kW, e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada.

Segundo a ANEEL (2016), quando a energia injetada na rede for maior que a consumida, o consumidor receberá um crédito de energia a ser utilizado para abater o consumo em outro posto tarifário (para consumidores com a tarifa horária) ou na fatura dos meses subsequentes, sendo que os créditos são válidos por sessenta meses. Há ainda a possibilidade de o consumidor utilizar os créditos em outras unidades previamente cadastradas para o mesmo titular, desde que dentro da mesma área de concessão, sob o domínio da mesma agência distribuidora de energia elétrica.

Alguns trabalhos retratam aplicações da tecnologia de energia solar dentro de edificações com atividade agrícola, ambientalmente controladas (resfriamento, aquecimento e iluminação), aplicando o sistema de hidroponia (HASSANIEN et al., 2016; YANO et al., 2014).

Yano et al. (2014) desenvolveram um protótipo de um módulo solar semi-transparente microesférico para aplicações em estufa agrícola, usando dois módulos. Primeiramente, usou-se 1.500 microcélulas solares esféricas (1,8 mm de diâmetro, silício cristalino) com densidade de 15,4 células.cm<sup>2</sup> em (108 mm x 90 mm); 39% da área deste módulo foi coberta com microcélulas solares esféricas e os restantes 61% foram transparentes para permitir que a maior

parte da luz solar entrasse na estufa para promover a fotossíntese das plantas. Depois, 500 células com densidade de 5,1 células.cm<sup>2</sup>, onde 30% da área deste módulo foi coberta com as células. Eles concluíram que, de acordo com a produção anual de energia elétrica por unidade de área da estufa, os módulos fotovoltaicos semitransparentes eram potencialmente adequados para estufas com sistemas básicos de controle ambiental em regiões de alta radiação solar, onde a produção de eletricidade poderia ser alta e a demanda baixa no inverno.

Hassanien et al. (2016) fizeram referências ao uso da energia solar fotovoltaica sobre os modelos de produção agrícola *indoor*. Eles apontaram soluções como o uso de células fotovoltaicas de silício cristalino intercaladas em coberturas transparentes (Figura 9). Os pesquisadores descreveram que o uso dessa tecnologia depende da quantidade de iluminância que determinada planta necessita para realizar corretamente a fotossíntese. Assim, um cultivo com alto valor requerido de iluminância poderia não obter seu pleno desenvolvimento. Todavia, em locais com alto teor de irradiação solar, os vãos da vedação transparente com passagem de luz natural podem acompanhar materiais que façam a difusão dessa iluminação, sem gerar áreas de sombra que poderiam ser provocadas pelas células fotovoltaicas, garantindo o pleno desenvolvimento dos produtos agrícolas.

**Figura 9** - Aplicação de células fotovoltaicas de filme fino em cobertura de vidro.



Fonte: Hassanien et al. (2016).

Faisal Mohammed et al. (2007) utilizaram um sistema híbrido de painéis fotovoltaicos para resfriamento de uma estufa, em clima tropical, em Selangor, na Malásia. Esse sistema incluía quarenta e oito painéis fotovoltaicos, com potência de 18,75 W cada, um inversor, um controlador de carga e um banco de baterias (incluindo 12 baterias, sistema *off grid*). O consumo elétrico se fazia pelo uso de dois ventiladores para resfriamento da estufa, com potência elétrica de 400 W, em uma operação diária de cinco horas. Descobriu-se que o sistema

fotovoltaico poderia ser adequado no fornecimento de eletricidade para cobrir as demandas elétricas, sem usar energia extra da rede.

Yildiz et al. (2012) avaliaram desempenho energético de um sistema de ventilação subterrânea, assistida por energia solar fotovoltaica para o resfriamento de uma estufa agrícola. Verificou-se que o valor médio da diferença de temperatura entre a entrada e a saída de ar no túnel era de 8,29 °C. O consumo total de energia elétrica deste sistema foi de 8,10 kWh, operando por cerca de 11 h/dia. A pesquisa concluiu que 34,55% da demanda de energia poderia ser fornecida por painéis fotovoltaicos. Porém, essa opção dependeria, principalmente, da quantidade de módulos utilizados e da irradiação solar no local.

Hassanien et al. (2016) promoveram um estudo de viabilidade econômica de sistemas de resfriamento térmico, a partir da energia solar. Mostraram que o sistema é mais viável em climas quentes do que em climas europeus moderados. Os custos específicos por kWh de refrigeração na Alemanha, por exemplo, variaram entre 0,25 e 1,01 euros/kWh. Na Espanha variaram entre 0,13 e 0,30 euros/kWh. Em climas quentes, como em Jacarta (Indonésia) e Riade (Arábia Saudita), os custos específicos seriam baixos, entre 0,09 e 0,15 euros/kWh.

Cossu et al. (2014) investigaram os efeitos do sombreamento do arranjo fotovoltaico, em plantas de tomate, em uma estufa agrícola com orientação leste-oeste, da qual 50% de sua área de cobertura foi substituída por módulos fotovoltaicos de silício policristalino. Eles integraram a radiação natural com iluminação suplementar, alimentada pela energia fotovoltaica. Assim, descobriram que o gerador fotovoltaico reduziria a disponibilidade de irradiação solar dentro da estufa em 64%. No entanto, a iluminação suplementar, alimentada sem exceder a energia produzida pelo painel fotovoltaico, seria suficiente para garantir o desenvolvimento pleno das plantas.

Al-Chalabi (2015) fez uma análise da viabilidade de uma Fazenda Vertical, no Reino Unido. O autor examinou, por simulação, a quantidade de energia necessária para operar tal edificação e o quanto um sistema de energia renovável poderia atenuar o uso da eletricidade da rede pública. Como energia renovável foi adotada a fotovoltaica. A conclusão foi de que a viabilidade técnica e econômica da implantação de um sistema fotovoltaico para uma Fazenda Vertical estava diretamente relacionada à área de cada piso. Esse resultado deveu-se à possibilidade de entrada de iluminação e/ou ventilação natural e a capacidade de instalação do sistema fotovoltaico no espaço disponível. Para pisos com até 506 m<sup>2</sup>, a aplicação de 1.398 painéis fotovoltaicos ainda seria viável. Para pisos com área próxima de 625 m<sup>2</sup> - e a partir disso

- não haveria viabilidade para a instalação de um sistema fotovoltaico. Al-Chalabi (2015) alegou que o uso dos painéis para a agricultura urbana pode ser mais favorável em locais com alta incidência solar. Afirma ainda que existem poucas pesquisas relacionadas ao tema.

## 2.7 ESTUDOS DE VIABILIDADE ECONÔMICA EM FAZENDAS VERTICAIS

A análise de viabilidade econômica de um projeto consiste em verificar se as receitas inerentes superam os custos e os investimentos necessários para colocá-lo em prática (REZENDE; OLIVEIRA, 2008).

Tomando essa definição, observou-se em pesquisas realizadas que dentre os sistemas para produção de alface em campo aberto, túnel baixo, cultivo no solo dentro de estufa e hidroponia, o último foi o que apresentou melhor desempenho econômico (BOARETTO, 2004; ROVER et al., 2016).

De acordo com Lucena (2014), a primeira Fazenda Vertical das Américas foi inaugurada em setembro de 2010, no terraço do edifício da empresa *Easy Park*, em Vancouver, no Canadá. Essa Fazenda Vertical foi, na época, capaz de fornecer seus produtos com baixas perdas de vitaminas, minerais ou nutrientes. Pelo fato de os produtos cultivados serem distribuídos para seus clientes, num raio máximo entre 10 e 15 km, reduziu-se, significativamente, as perdas de nutrientes e a defasagem na qualidade final do produto. Todo o serviço de embalagem e confecção dos vegetais até a entrega ao consumidor final era realizado em um período máximo de uma hora. Na Fazenda Vertical de Vancouver, cada 1 m<sup>2</sup> equivalia a 1,69 m<sup>2</sup> da área da produção horizontal. Se houvesse uma verticalização em pavimentos, observadas as questões de logística, certamente a produção seria potencializada quando comparada à produção horizontal.

Lucena (2014) realizou em estudo de viabilidade econômica desse empreendimento, que funciona com sistema de hidroponia. O investimento da implantação da Fazenda Vertical foi de 606,6 mil dólares canadenses. Os custos operacionais, em 2012, ficaram em quase 865,4 mil dólares canadenses, e a receita no mesmo ano foi de pouco mais de 901 mil dólares canadenses. Como se vê, o modelo tornou-se economicamente viável.

Em outro estudo de viabilidade econômica de uma Fazenda Vertical (baseado em projeto/simulação), Banerjee (2014) relatou que, devido ao ambiente fechado e à iluminação controlada, a produtividade na Fazenda Vertical foi duas vezes maior que na agricultura tradicional. Somou-se ainda que apenas 0,25 ha de área do terreno foi necessária para a construção vertical. Logo, na análise da autora, o rendimento total da produção poderia aumentar em comparação com a agricultura tradicional, através do empilhamento da produção.

Ainda segundo as palavras da autora, a Fazenda Vertical pode ser um viável risco. Os mercados para esse tipo de empreendimento, com grandes dimensões, estão em locais populosos (a partir de 5 milhões de habitantes), com PIB (Produto Interno Bruto) acima de 20.000 dólares, em regiões desérticas, de Taiga ou mesmo em megacidades.

As Fazendas Verticais devem ser baratas para construção, duráveis e seguras para operar, e independentes de subsídios econômicos e apoio externo. Devem proporcionar lucro, que é o principal desafio de um modelo vertical de produção (DESPOMMIER, 2011). Além disso, dadas as condições atuais, para realmente se tornar viável, os produtos de um modelo de atividade agrícola verticalizado devem possuir preços compatíveis com os de cultivo convencionais. Caso contrário, esses serão esquecidos nas prateleiras dos supermercados.

Hassanien et al. (2016) sugeriram escolher as plantas ou vegetais mais adequados ao cultivo em Fazendas Verticais, tais como alface, espinafre, cenoura, nabo, repolho e brócolis, assim como plantas ornamentais de sombra e flores que necessitam de baixa intensidade de luz.

De acordo com Paula Júnior e Venzon (2007), a alface (*Lactuca sativa L.*) pertence ao conjunto de hortaliças folhosas de maior consumo e importância comercial no mundo. No Brasil, essa hortaliça está entre as mais inerentes quanto aos aspectos de produção, comercialização e valor nutricional. A especialização crescente do cultivo de alface vem determinando a ampliação da escala produtiva dessa hortaliça. Não obstante, exige-se do produtor melhor qualidade, diversidade e regularidade de produção, especialmente no verão, quando a demanda por esse produto é maior.

As aplicações de energias renováveis em estufas agrícolas devem receber alta prioridade nos estudos referente ao tema, sendo uma busca para se reduzir o consumo elétrico. A operação e a manutenção do bombeamento de água, que leva em consideração a distância da rede de abastecimento de água, a velocidade em que a água chega à estufa e o local para o armazenamento, é um fator crítico na determinação da viabilidade econômica das tecnologias de bombeamento hidropônico (DÍAZ-MÉNDEZ et al., 2014; MEAH et al., 2008). Ademais, como relatam Hassanien et al. (2016), quando da opção dos painéis fotovoltaicos, deve-se tomar precauções. As altas taxas de umidade e os agroquímicos podem afetar a longevidade dos painéis integrados nos telhados das estufas. Soma-se que a variabilidade das condições microclimáticas, particularmente a baixa incidência solar sob painéis fotovoltaicos, pode ter um efeito negativo, inviabilizando a instalação desse sistema.

Ureña-Sánchez et al. (2012) realizaram um estudo que apontou o retorno do investimento realizado (*payback*) para a instalação de painéis fotovoltaicos em estufas agrícolas em 18 anos, isso no bioclima espanhol. Para regiões tropicais, como é o caso do Brasil, desde que o sistema seja bem planejado, esse retorno pode ser mais rápido.

### 3 MÉTODO DA PESQUISA

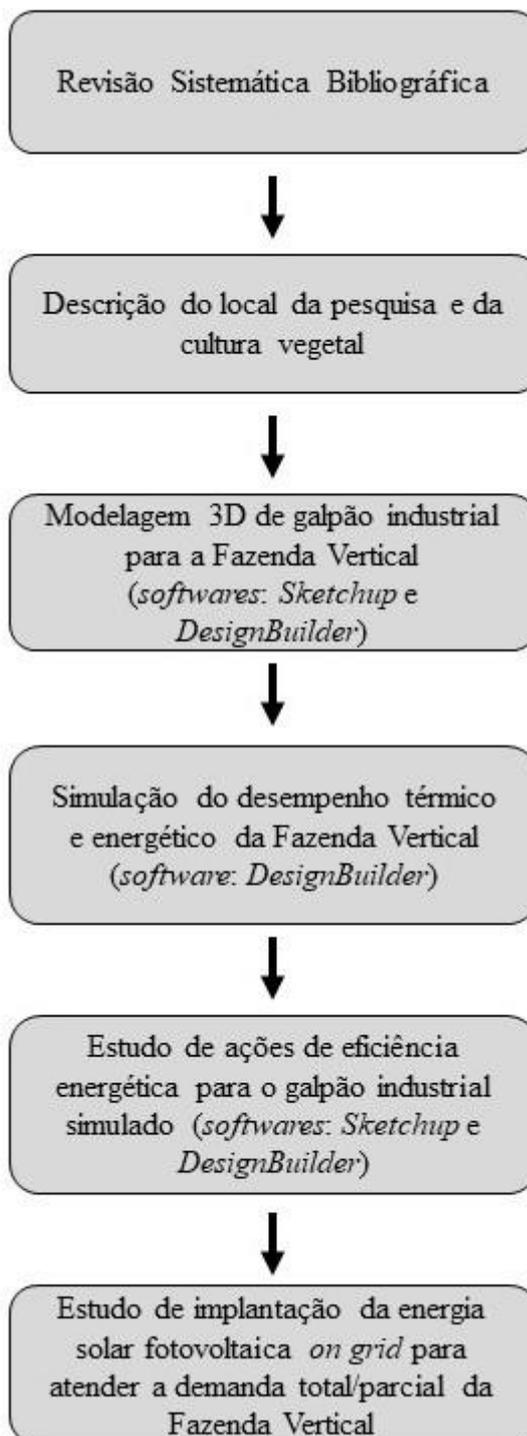
Entende-se que uma pesquisa aplicada e exploratória envolvendo um modelo de cultivo vertical, com o uso da energia solar fotovoltaica, em locais onde existe alta incidência de irradiação solar, será de grande valor ao meio científico (BANERJEE, 2014).

Em busca de identificar e obter informações metodológicas dos trabalhos mais atualizados relacionados ao consumo energético em Fazendas Verticais, optou-se por realizar uma Revisão Sistemática Bibliográfica (Item 3.1). Ao final desse levantamento, e com a leitura minuciosa desses trabalhos, junto a outras publicações que se julgaram inerentes ao tema, a pesquisas de Benis et al. (2017) e Al-Chalabi (2015) foram usadas como referência na elaboração de etapas de projeto e procedimentos de análise.

A opção pelo trabalho de Benis et al. (2017) ocorreu porque esses pesquisadores criaram um fluxo de trabalho para análise de tomada de decisões na implantação e operação da agricultura *indoor*, no contexto urbano. Através de *softwares* e estimativas, eles simularam o potencial de produção e o consumo energético de modelos de produção horizontal e vertical (ver Item 2.2).

Com relação à pesquisa de Al-Chalabi (2015), investigou-se, através de estimativas, a viabilidade técnica e econômica da instalação de painéis fotovoltaicos na agricultura vertical com sistema hidropônico, em um edifício de 30 (trinta) pavimentos. Eles analisaram os pavimentos em diferentes áreas com painéis fotovoltaicos instalados na cobertura e em uma das fachadas.

Assim, com base nesses trabalhos, elaborou-se uma sequência de etapas para o desenvolvimento dessa pesquisa (Figura 10). Para melhor compreensão, esses procedimentos serão aqui descritos, separadamente.

**Figura 10** - Etapas do projeto.

Fonte: autor (2019).

### 3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

Para obter dados confiáveis e informações relevantes com relação ao encontro das variáveis “energia” e “Fazenda Vertical”, fez-se necessário realizar um levantamento bibliográfico sistemático. Sampaio e Mancini (2007) relatam que a Prática Baseada em

Evidência (PBE) é dada como um uso consciente, explícito e criterioso para a prática da pesquisa científica, e trabalhos desenvolvidos de forma criteriosa fornecem certezas para auxiliar na tomada de decisão. Tais informações enfatizam que a procura por respostas na pesquisa científica deve ser embasada na melhor evidência possível.

Ainda de acordo com os mesmos autores, deve-se fazer uma busca na literatura correspondente e avaliar quais serão os trabalhos que servirão de base para a pesquisa a ser realizada. As revisões sistemáticas se encaixam perfeitamente para desempenhar esse papel, pois possibilitam uma análise objetiva e qualitativa dos resultados e habilitam a criação de uma hipótese conclusiva sobre determinado tema de trabalho. Trata-se de uma forma de pesquisa que faz uso da literatura como fonte de dados.

Como esse tema é recente (DESPOMMIER; ELLINGSEN, 2008), são poucos os trabalhos disponíveis. Dessa forma, as buscas na literatura foram realizadas com o intuito de encontrar informações que fossem relevantes ao consumo de energia para com esse modelo de agricultura.

Primeiramente, no primeiro bimestre de 2019, foram realizadas buscas no banco de dados do *Scopus* (envolvendo título, resumo e palavras-chave), com os descritores “*Vertical Farm*” AND *Energy*. Como mostra o Quadro 2, fez-se uma filtragem captando os trabalhos publicados entre os anos de 2007 e 2018 (critério 1), em formato de artigo científico (critério 2), independentemente do conteúdo abordado pela revista (excluiu-se citações, patentes, livros, teses e dissertações). O filtro seguinte se deu com a leitura do texto dos trabalhos encontrados após a filtragem do critério 2, selecionando os que abordam sobre o uso/consumo de energia em Fazendas Verticais, com escrita na língua inglesa ou portuguesa (critério 3). Os artigos que passaram por essa filtragem foram analisados quanto a sua qualidade (critério 4).

**Quadro 2** - Critérios de inclusão.

Nº	Critério	Razão do critério
1.	Trabalhos publicados entre os anos de 2007 e 2018.	Verificar o "Estado da Arte" do tema.
2.	Formato de artigo científico.	Identificar trabalhos resumidos publicados em revistas com alto extrato Capes
3.	Abordagem sobre o uso/consumo de energia em Fazendas Verticais.	Direcionar ao problema da pesquisa.
4.	Qualidade do artigo.	Evitar trabalhos com dados inconsistentes ou incompletos.

Fonte: Autor (2019).

## 3.2 LOCAL DA PESQUISA E CULTURA VEGETAL

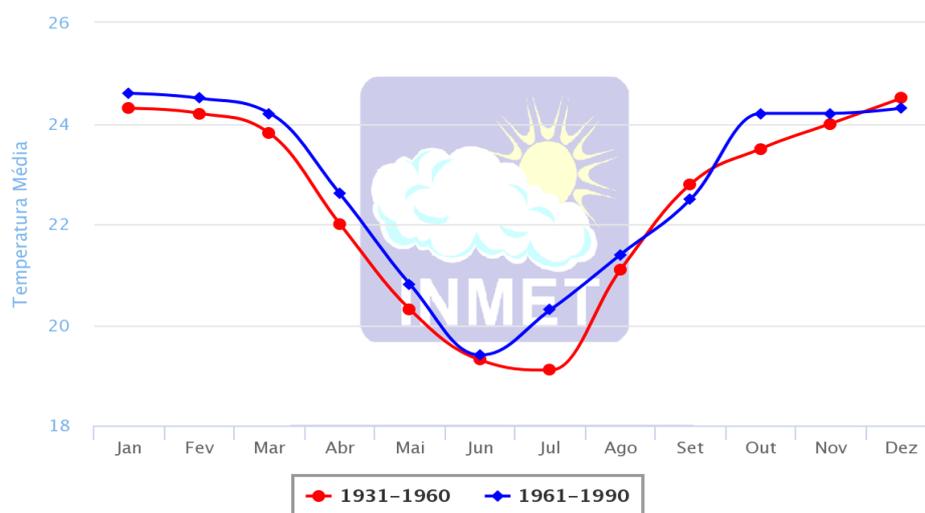
As características do local da pesquisa onde foi realizada a simulação e as necessidades para o pleno desenvolvimento da cultura vegetal serão descritas a seguir.

### 3.2.1 Local da pesquisa

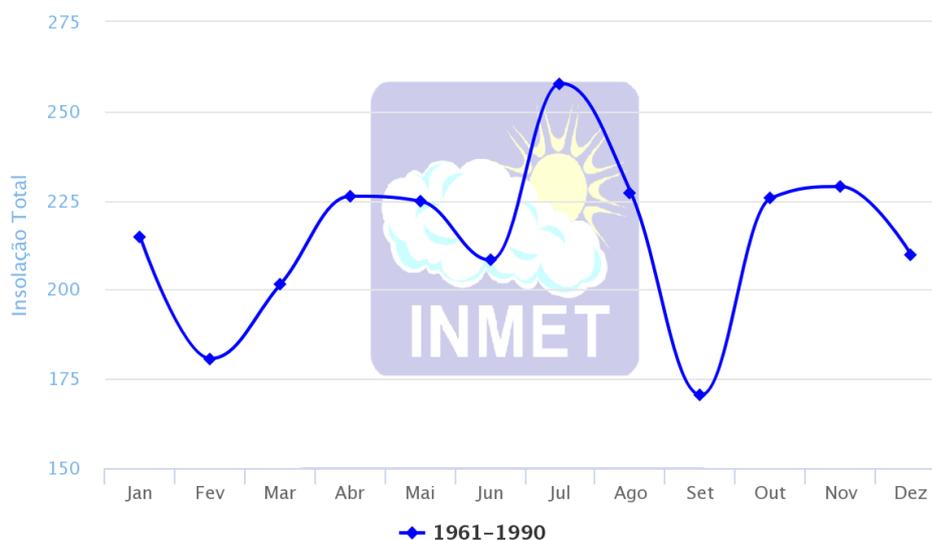
O projeto foi simulado para a região de Campo Grande/MS, que está localizado na Latitude  $-20,43^\circ$  e Longitude  $-54,72^\circ$ , dentro da região Bioclimática 6 (ABNT NBR 15220, 2003). Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2009), para esse município as médias anuais climatológicas são:

- Temperatura: a temperatura média varia entre  $19,1^\circ\text{C}$  (inverno) e  $24,6^\circ\text{C}$  (verão), como ilustra a Figura 11, sendo que a temperatura média mínima anual é  $13,5^\circ\text{C}$ , no mês de julho, e a temperatura média máxima anual é de  $30,8^\circ\text{C}$ , no mês de dezembro;
- Umidade Relativa do ar: oscila entre 58,9% (mês de agosto) e 81% (mês de fevereiro);
- Insolação: média de 2.576,1 horas anuais, sendo o tempo de insolação médio mínimo de 170,5 horas (mês de setembro) e o tempo de insolação médio máximo de 257,8 horas (mês de julho) – a média mensal é de 214,67 horas (Figura 12);
- Ventos: velocidade entre 3,5 m/s e 4 m/s, oriundos do Leste e Nordeste.

**Figura 11** - Média anual de temperatura em Campo Grande/MS ( $^\circ\text{C}$ ).



Fonte: INMET (2009).

**Figura 12** - Média anual de insolação em Campo Grande/MS (horas).

Fonte: INMET (2009).

### 3.2.2 Cultura vegetal

A alface (*Lactuca Sativa*) foi o vegetal escolhido, devido a sua importância nutricional e a alta demanda no mercado (PAULA JÚNIOR; VENZON, 2007). Segundo Boaretto (2004), no ambiente natural, a céu aberto, seu ciclo se completa em até 80 dias. Em sistema hidropônico, esse período tende a diminuir para 30 dias.

A faixa de temperatura mais adequada para a produção e o desenvolvimento da alface está entre 15 e 24 °C (MAYNARD; HOCHMUTH, 2007). Porém, a temperatura máxima tolerada por essa cultura está em torno de 30 °C, e a mínima por volta dos 6 °C (SGANZERLA, 1990). Tais condições permitem o trabalho com uma faixa de climatização mais adaptável ao clima local, diminuindo o uso de equipamentos de climatização mecânica.

### 3.3 MODELAGEM 3D DO GALPÃO PARA A FAZENDA VERTICAL

Com base na pesquisa de Al-Chalabi (2015), foi constatado que a viabilidade técnica e econômica da instalação de painéis fotovoltaicos em Fazendas Verticais, situadas em locais com boa insolação, está vinculada à área do piso de cada pavimento (Tabela 1).

Os dados apresentados na pesquisa de Al-Chalabi indicam que a instalação de um sistema fotovoltaico pode ser economicamente viável para áreas entre 100 e 506 m<sup>2</sup> e inviáveis para áreas entre 625 e 900 m<sup>2</sup>, considerando que a construção é vertical e com área de telhado idêntica à área do pavimento.

**Tabela 1** - Uso de PSFs (Painéis Solares Fotovoltaicos) em diferentes áreas de Fazendas Verticais.

Dimensões da edificação		Demanda energética (um mês)			Energia suplementar	Viabilidade dos PSF	
Comprimento x Largura (m)	Área do piso (m <sup>2</sup> )	Bombeamento (kWh)	Iluminação (kWh)	Total (kWh)	Número de PSF necessários	Número de PSF possíveis nas superfícies dadas	Número possível / Número requerido
10	100	148	0	148	4	593	Viável
20	400	591	0	591	15	1289	Viável
22,5	506	748	57.946	58.694	1398	1479	Viável
25	625	923	137.388	138.311	3294	1675	X
28	784	1158	257.393	258.551	6165	1920	X
30	900	1329	352.350	353.679	8421	2088	X

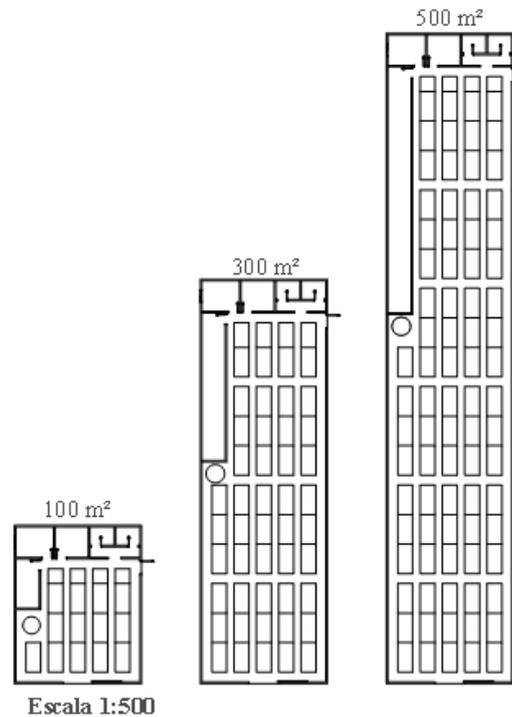
Fonte: Adaptado de Al-Chalabi (2015).

O autor constatou que a viabilidade ocorre nas três primeiras áreas, porque com 100 m<sup>2</sup> e 400 m<sup>2</sup> de área de piso foi possível utilizar quase totalmente a iluminação natural (dimensões de 10 m e 20 m) e com a área de 506 m<sup>2</sup> utilizou-se parcialmente a iluminação artificial, não demandando muita carga, e com área suficiente de telhado para a instalação do sistema fotovoltaico que atenda a instalação. As três dimensões finais resultaram em inviabilidade técnica e econômica pois requeriam mais área de painel solar que o telhado poderia acomodar.

Com base nos resultados de Al-Chalabi (2015), foram implementadas via *software* três dimensões diferentes de galpão industrial, com áreas produtivas de 100 m<sup>2</sup>, 300 m<sup>2</sup> e 500 m<sup>2</sup>, para a região de Campo Grande/MS (Figura 13). Observa-se, entretanto, que nessa simulação o galpão é horizontal, pois se trata de um modelo com características edilícias baseadas em um sistema de baixo padrão de acabamento, o qual é comum o uso no Brasil (ALENCAR, 2019). O galpão foi modelado no *software Sketchup* (Figura 14), que é um programa de desenho em 3D, licenciado em nome do autor.

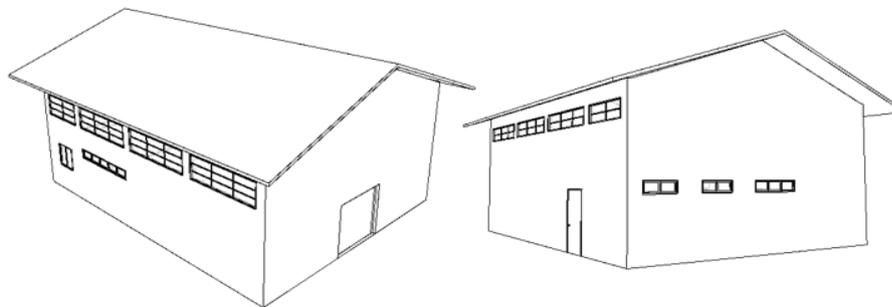
Além de ser modelado no *Sketchup*, foi necessário modelar o galpão no *software DesignBuilder*, usando a licença de avaliação. O *DesignBuilder* é um programa de avaliação de desempenho térmico, lumínico e energético que utiliza como principal motor de cálculo outro *software* de simulação, o *EnergyPlus* (DESIGNBUILDER, [s.d.]). Este é utilizado para a realização dos cálculos de carga térmica e análise energética, através da entrada de dados climáticos, de funcionamento da atividade proposta e dos índices de absorvância ( $\alpha$ ), de emissividade ( $\epsilon$ ), de densidade ( $\rho$ ), de condutividade térmica ( $\lambda$ ), de calor específico ( $c$ ) e de resistência térmica ( $R$ ) dos materiais da edificação (ABNT NBR 15220, 2003; DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS, 2018; LABORATÓRIO NACIONAL DO DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS EUA, [s.d.]).

**Figura 13** - Planta das três diferentes áreas do galpão.



Fonte: Autor (2019).

**Figura 14** – Galpão (modelo de 100 m<sup>2</sup> de área produtiva) simulado nessa pesquisa.



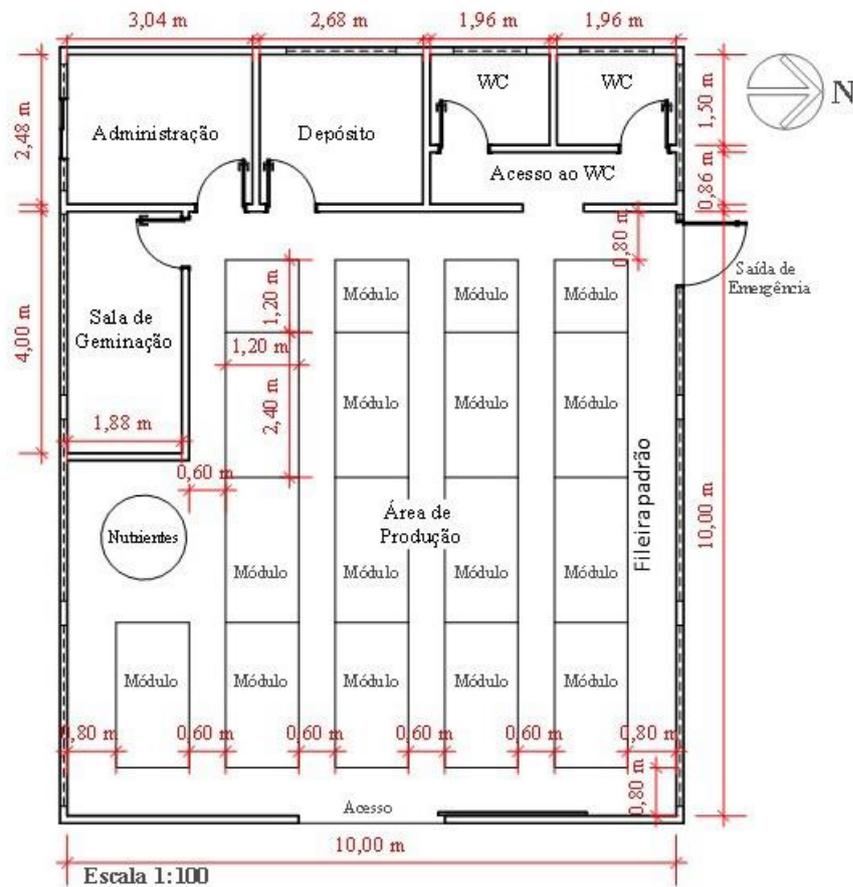
Fonte: Autor (2019).

Segundo Westphal e Lamberts (2006), o *EnergyPlus* também permite que se faça uma avaliação térmica e energética em edifício já ocupado, com a finalidade de direcionar as decisões para se obter meios de melhorar o conforto térmico e/ou a eficiência energética da edificação.

O galpão contempla um ambiente administrativo, um depósito, uma sala de geminação, um corredor de acesso aos banheiros (chamado circulação), sala de produção e dois banheiros (Figura 15). Independente da comparação entre as três áreas (100 m<sup>2</sup>, 300 m<sup>2</sup> e 500 m<sup>2</sup>), as áreas

da sala administrativa, do depósito, da circulação e dos banheiros ocupam sempre a mesma área e não foram contabilizadas nas metragens mencionadas. O consumo energético desses ambientes, entretanto, foi calculado, juntamente com as áreas da Fazenda Vertical, nas quais existe produção (salas de geminação e de produção).

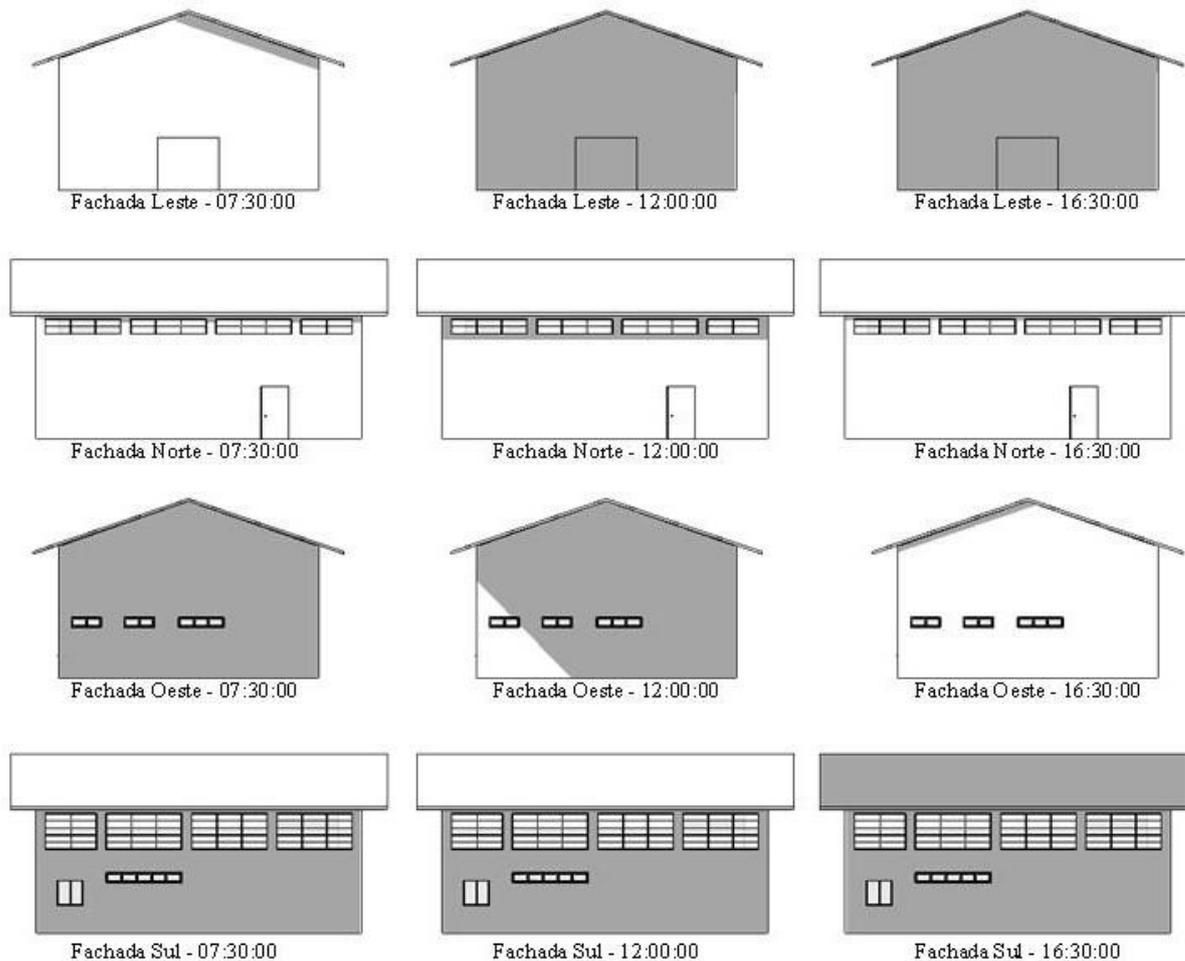
**Figura 15** - Planta baixa do galpão (modelo de 100 m<sup>2</sup> de área produtiva).



Fonte: Autor (2019).

Todos os ambientes possuem janelas posicionadas de modo a evitar a transmissão direta pela radiação solar. Para isso, foi realizado um estudo de orientação do edifício e de posicionamento das aberturas no *Sketchup*. Isso foi possível graças à ferramenta “Adicionar localização”, que permite simular a posição correta do sol em determinada data e hora do ano quando a função “Mostrar sombras” é habilitada. Assim, as fachadas Leste e Oeste não possuem janelas em contato direto com as salas de produção e de geminação, visto que essas são as fachadas que recebem maior incidência solar. As aberturas destinadas ao aproveitamento da luz e da ventilação natural foram alocadas nas fachadas Norte e Sul (Figuras 16 e 17). Como os ventos predominantes do local vêm do Nordeste, pode-se fazer o aproveitamento desse recurso para o arrefecimento do ambiente através da ventilação cruzada (INMET, 2009).

**Figura 16** - Estudo de insolação nas fachadas no Solstício de Inverno (dia 21.06) – *software Sketchup*.



Fonte: Autor (2019).

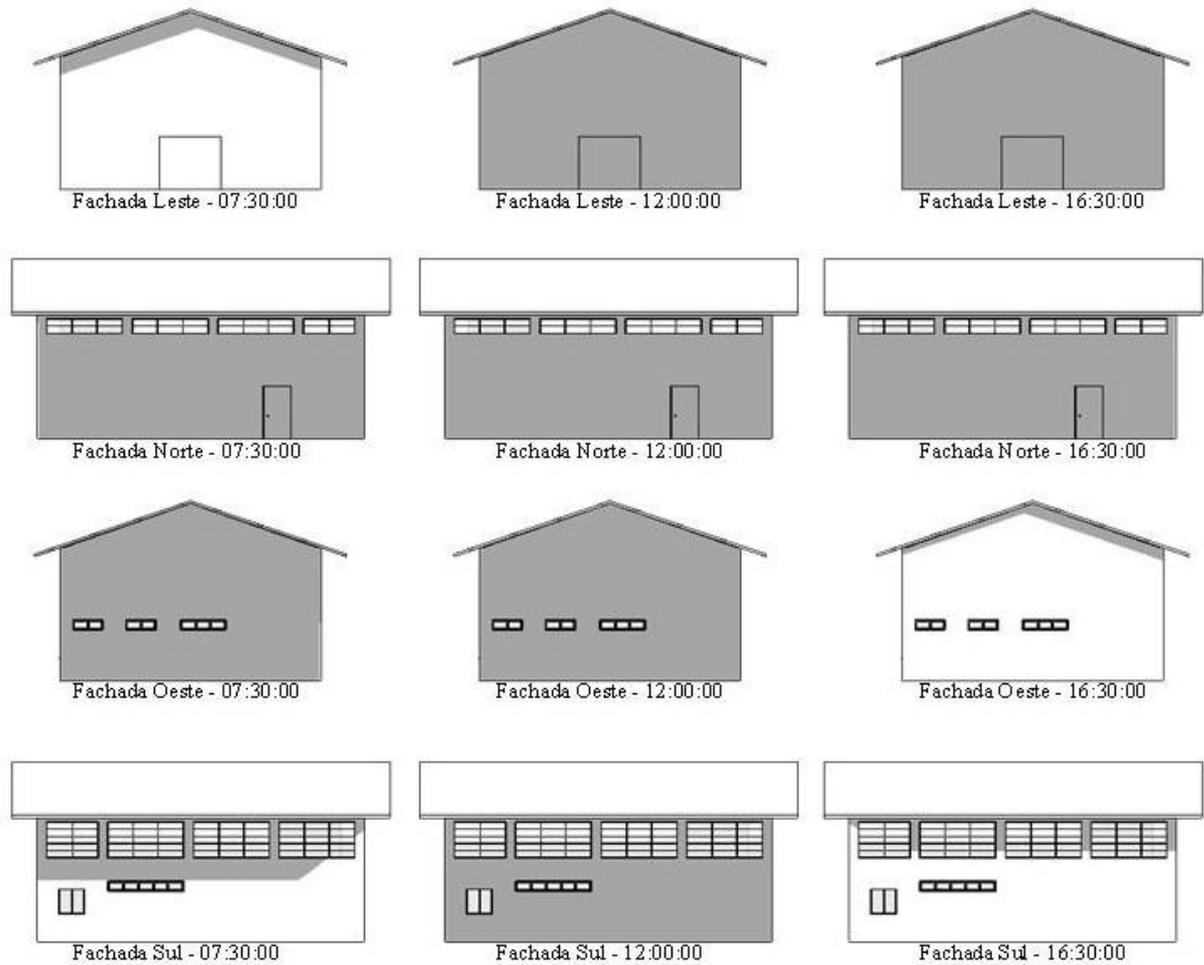
Para a simulação da análise térmica e energética do galpão, foram adotados os seguintes materiais e técnicas construtivas (ABNT NBR 15575, 2013; ABNT NBR 15220, 2003; ALENCAR, 2019):

- Vedação vertical (paredes em geral): bloco de concreto com medidas de 9 cm x 19 cm x 39 cm, argamassa de assentamento de 1 cm, reboco (acabamento grosso) com espessura de 1,5 cm em cada face da parede (interna e externa), pintura na cor branca (interno e externo), com massa corrida interna tipo PVA (Acetato de Polivinila) e externa tipo acrílica (espessura aproximada de 1 mm em cada face);
- Vedação vertical (paredes externas dos banheiros): bloco de concreto com medidas de 9 cm x 19 cm x 39 cm, argamassa de assentamento de 1 cm, reboco (acabamento grosso) com espessura de 1,5 cm em cada face de parede (interna e externa), massa acrílica com pintura externa na cor branca (espessura aproximada de 1 mm),

argamassa de assentamento cerâmico (espessura de 5 mm) e revestimento cerâmico com espessura de 8 mm nas faces internas ao ambiente;

- Piso: concreto armado com tela de aço de bitola 5/16 polegada, polido, com espessura total de 10 cm em toda a extensão da edificação;
- Cobertura: telha metálica tipo *sandwich* com inclinação de 19° e beiral de 1,00 m, sem laje, com face externa metálica, pintada com tinta branca esmaltada, e revestida com material isolante de Poliuretano em sua face interna. A estrutura de apoio da cobertura é de metal, pintado na cor branca. A sala de geminação, a administração, o depósito e os banheiros possuem laje e forro de gesso em placas;
- Estrutura: Os pilares e vigas são de concreto armado tipo pré-moldado, postados de forma que possam proporcionar um vão de 3,00 m entre os pilares, que serviram para alocar as janelas;
- Esquadrias: janelas com armação metálica em tonalidade pastel e vedação em vidro incolor 6 mm, do tipo basculante, proporcionando 100% de abertura para o uso da ventilação natural. Todas as portas são de metal, também em tonalidade pastel. A porta de acesso ao estabelecimento tem abertura de 2,40 m x 2,10 m, as portas da sala administrativa, do depósito e dos banheiros possuem aberturas de 0,80 m x 2,10 m. Há uma porta para saída de emergência, com dimensão de 1,10 m x 2,10 m (ABNT 15575, 2015);
- Dimensões trabalhadas: o pé direito no ponto mais alto é de 7 m (pé direito duplo), sendo que na sala administrativa, na sala de geminação, no depósito, na circulação e nos banheiros o pé direito é de 3 m, devido à laje e ao forro de gesso acartonado. O galpão possui largura de 10 m, deixando como variável apenas o comprimento das áreas produtivas: 10 m (100 m<sup>2</sup>), 30 m (300 m<sup>2</sup>) e 50 m (500 m<sup>2</sup>), conforme a Figura 13.

**Figura 17** - Estudo de insolação nas fachadas no Solstício de Verão (dia 21.12) – *software Sketchup*.

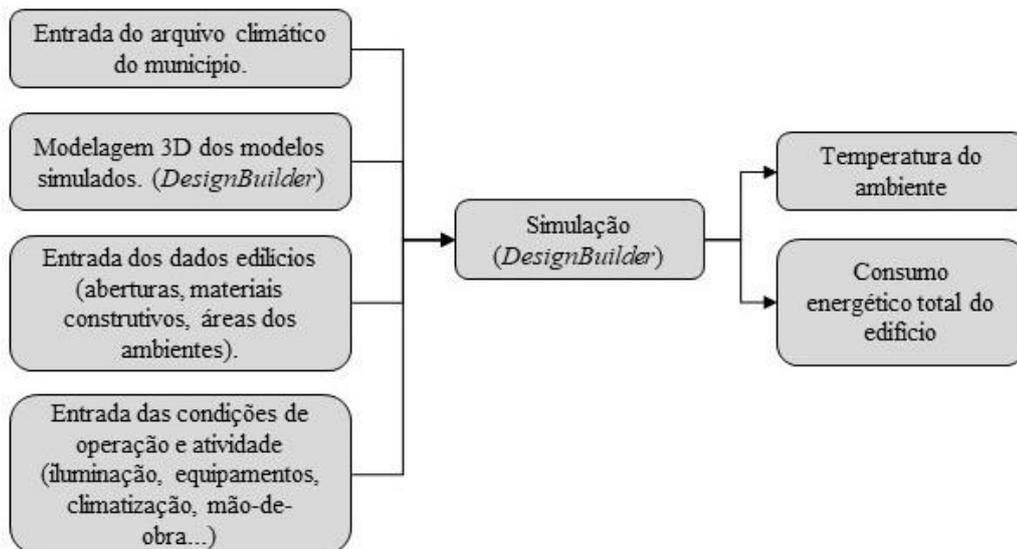


Fonte: Autor (2019).

### 3.4 SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO

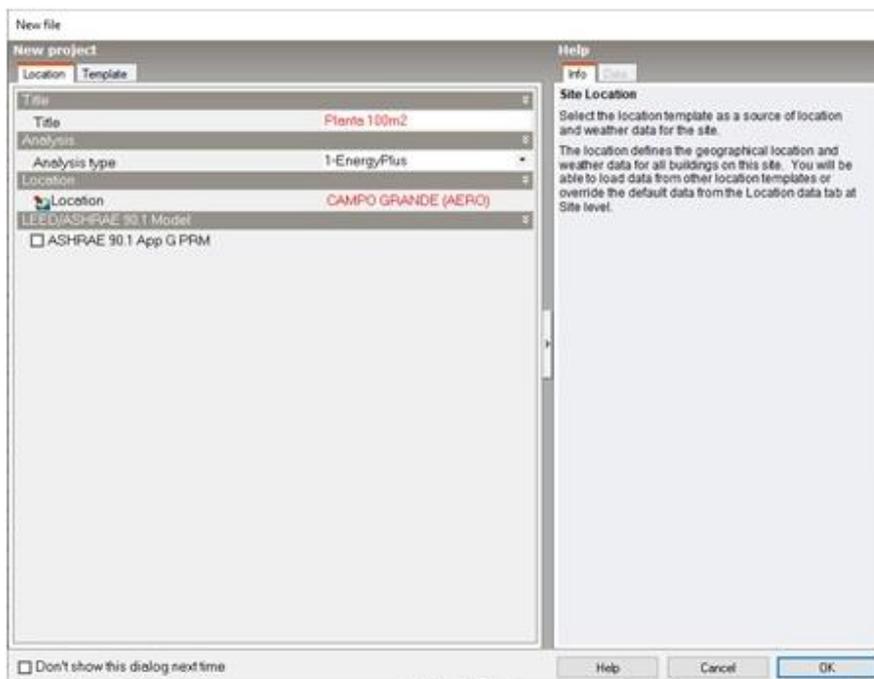
Após a modelagem 3D do galpão, no programa *Sketchup*, foram realizadas as etapas de simulação no *software DesignBuilder* (Figura 18). Já na abertura do novo projeto dentro do programa, uma janela se abriu solicitando indicar a localização onde o projeto estará inserido (Figura 19). Selecionado o município de Campo Grande/MS, o *download* do arquivo bioclimático, o qual enquadra o município dentre as demais zonas bioclimáticas dadas pela ABNT NBR 15220 (2003), contendo informações anuais, se iniciou automaticamente. Assim, fez-se a modelagem dos três modelos de galpão com a devida orientação em relação ao Norte, outrora já descrita (Figura 20).

**Figura 18** - Etapas da simulação (*DesignBuilder*).



Fonte: Autor (2019).

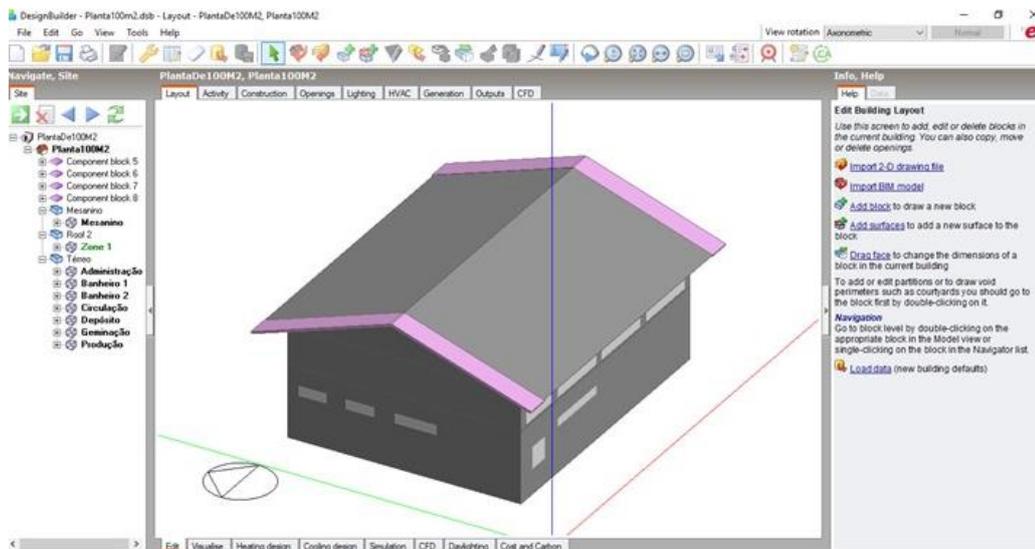
**Figura 19** - Janela de abertura de novo projeto no *DesignBuilder*.



Fonte: Adaptado de *DesignBuilder* (s.d.).

Depois da modelagem foi necessário incluir no *DesignBuilder* as características das atividades exercidas nos ambientes, das aberturas, da iluminação, do sistema de arrefecimento e dos materiais construtivos empregados junto a suas respectivas propriedades térmicas (Anexo A). O programa traz diversos *Templates* para essas características e recomenda que estes sejam utilizados, adaptando-os de acordo com as necessidades.

**Figura 20** - Galpão de 100 m<sup>2</sup> modelado no *DesignBuilder*.



Fonte: Autor (2019).

### 3.4.1 Configuração dos *Templates* de Atividades

Para melhor entendimento, optou-se por descrever as configurações de atividades de acordo com o ambiente, separadamente. Esses *Templates* foram escolhidos dentro da pasta “*Miscellaneous 24hr activities*” (menu “*Activity*”), que traz um grupo de atividades exercidas sem interrupções.

#### 3.4.1.1 Sala de produção

Foi escolhido o *Template* “*Heavy Plant Room*” por se tratar de uma atividade na qual, mesmo ininterrupta, existe baixo ou médio ganho térmico por equipamento ou ocupação transitória (DESIGNBUILDER, [s.d.]). Isso porque apesar da sala de produção ter como equipamento o conjunto moto-bomba para o funcionamento do sistema hidropônico, esse foi dimensionado em posição externa à edificação, evitando o ganho térmico.

Em seguida, foi definido que o “*Occupancy density*” fosse de 0,033 pessoas/m<sup>2</sup> para o galpão de 100 m<sup>2</sup>, de 0,018 pessoas/m<sup>2</sup> para o galpão de 300 m<sup>2</sup> e de 0,015 para o galpão de 500 m<sup>2</sup>, com um “*Schedule*” de ocupação ininterrupta (24 horas por dia, durante todos os dias). Esses valores de ocupação foram estabelecidos com a seguinte base: 1 (um) funcionário para limpeza, 1 (um) funcionário para manutenção e 1 (um) funcionário para cada 100 m<sup>2</sup> de área produtiva. O Clo (Isolamento térmico das roupas) foi definido como 0,8 para o inverno e 0,6 para o verão (SILVA, 2019).

Em “*Environmental Control*”, o “*Cooling Setpoint Temperatures*” foi estabelecido em 24 °C para a simulação a essa temperatura, e em 30 °C quando o controle da temperatura se fez para tal intensidade (MAYNARD; HOCHMUTH, 2007; SGANZERLA, 1990).

Em “*Lighting*”, o valor do “*Target Illuminance*” (iluminação entregue) foi configurado em 3.268 lux. Chegou-se a esse valor através da pesquisa de Kang et al. (2013), que apresentaram bons resultados em seu estudo – adotando PPFD (Densidade de Fluxo de Fótons Fotossintéticos) de 290  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  e fotoperíodo de 6/2 (claro/escuro). Nessa etapa, apenas fez-se a conversão da unidade de  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  para lux, seguindo os dados da luminária escolhida – LED vermelho e azul com faixa espectral entre 450 e 650 nm - que está descrita em 3.4.4 (WAVEFORM LIGHTING, [s.d.]).

Por último, a opção “*Office Equipment*” foi desabilitada, uma vez que o equipamento utilizado, conjunto moto-bomba, foi estimado externamente à edificação. Ressalta-se que o ganho térmico em relação à produção (à alface) foi desprezado devido ao seu baixo impacto no ambiente (GRAAMANS et al., 2017).

#### **3.4.1.2 Sala de geminação**

Segue a base da atividade que foi estabelecida na sala de produção. Altera-se daquele apenas o valor do “*Occupancy density*”, que foi de 0,1335 para o galpão de 100 m<sup>2</sup>, de 0,044 para o galpão de 300 m<sup>2</sup> e de 0,0267 para o galpão de 500 m<sup>2</sup>. Esses valores foram estabelecidos para 1 (um) funcionário trabalhando.

#### **3.4.1.3 Sala de administração**

Escolhido o *Template “24x7 Generic Office Area”* por se tratar de uma sala com atividade administrativa. O “*Occupancy density*” foi definido em 0,13 pessoas/m<sup>2</sup> para todos os tamanhos de galpão. Para esse ambiente, apenas 1 (um) funcionário foi estimado, com um “*Schedule*” de ocupação ininterrupta (24 horas por dia, durante todos os dias). O Clo foi estabelecido em 0,8 para o inverno e 0,6 para o verão (SILVA, 2019).

Em “*Environmental Control*”, o “*Cooling Setpoint Temperatures*” foi mantido com o valor padrão de “*Cooling*” em 24 °C e de “*Cooling set back*” em 28 °C, esses valores passam a atuar no ambiente quando o condicionador de ar estiver habilitado na aba HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*), que será trabalhada mais adiante no texto (DESIGNBUILDER, [s.d.]). Ainda em “*Environmental Control*”, O “*Target Illuminance*” da aba “*Lighting*” foi mantido em 400 lux, como sugere o *Template* da atividade exercida no ambiente.

A opção “*Computers*” foi habilitada e dimensionada para 1 (um) computador de mesa, com potência de 250 W, e um “*Schedule*” de uso ininterrupto (CEMIG, 2013). Isso gerou um valor de “*Power density*” de 32,29 W/m<sup>2</sup>.

A opção “*Office Equipment*” também foi habilitada com estimativa de uso para 1 (uma) impressora de 90 W, 1 (um) telefone sem fio de 3W, 1 (um) modem de *internet* de 12 W, 1 (uma) geladeira de 250 W e 1 (um) *scanner* de 50 W (CEMIG, 2013, 2014). Essas estimativas geraram um “*Power density*” de 53,93 W/m<sup>2</sup>. O “*Schedule*” de uso desses equipamentos foi mantido como padrão para o *Template* do ambiente, o “*Ware\_24x7CellOff\_Equip*” (DESIGNBUILDER, [s.d.]).

#### **3.4.1.4 Depósito**

Mantido o *Template* “*Heavy Plant Room*” pelo baixo ganho térmico por ocupação ou equipamento. O “*Occupancy density*” foi definido em 0,1510 pessoas/m<sup>2</sup> para todos os tamanhos de galpão, visto que a área desse ambiente não se altera. Apenas 1 (um) funcionário foi estimado, com um “*Schedule*” de ocupação ininterrupta (24 horas por dia, durante todos os dias). O Clo também foi estabelecido em 0,8 para o inverno e 0,6 para o verão (SILVA, 2019).

Em “*Environmental Control*”, o “*Cooling Setpoint Temperatures*” não foi editado, visto que para esse ambiente não foi prevista a instalação de condicionador de ar. Em “*Lighting*”, foi mantido o valor padrão do *Template* da atividade em “*Target Illuminance*”, que é de 100 lux. As funções “*Computers*” e “*Office Equipment*” foram desabilitadas, pois não houve estimativa de uso de equipamentos elétricos nesse ambiente.

#### **3.4.1.5 Circulação**

Utilizado o *Template* de atividade “*24x7 Circulation área (corridors and stairways)*”. Os índices de ocupação e controle ambiental foram mantidos como padrão. Apenas os valores de Clo foram substituídos, para 0,8 no inverno e 0,6 no verão (SILVA, 2019). Nesse ambiente não haveria presença de condicionador de ar e o “*Target Illuminance*” foi mantido em seu valor padrão para o *Template*, de 100 lux.

As funções “*Computers*” e “*Office Equipment*” foram desabilitadas, pois não houve o uso de equipamentos elétricos nesse ambiente.

### 3.4.1.6 Banheiros

O *Template* de atividade “24x7 Toilet” foi selecionado para esses ambientes. Foram alterados os dados de Clo – para 0,8 no inverno e 0,6 no verão (SILVA, 2019) – e desabilitadas as funções “Computers” e “Office Equipment”. O “Target Illuminance” foi mantido em 200 lux. Também não houve o uso de condicionador de ar, apenas ventilação natural.

Para facilitar a compreensão das informações inseridas no menu “Activity” do *DesignBuilder*, optou-se por criar uma tabela resumo (Tabela 2).

### 3.4.2 Configuração das propriedades térmicas da construção

Os dados de propriedades térmicas inseridos no *DesignBuilder* correspondem às técnicas construtivas e materiais que estão descritos no Item 3.3. Esses dados foram inseridos no menu “Construction” do programa, também adotando o uso de *Templates*.

Os valores de absorvância ( $\alpha$ ), de emissividade ( $\varepsilon$ ), de densidade ( $\rho$ ), de condutividade térmica ( $\lambda$ ), de calor específico ( $c$ ) e de resistência térmica ( $R$ ) dos materiais do edifício foram inseridos com base na NBR 15220 (2003). As informações que não puderam ser encontradas nessa norma foram buscadas em teses e na própria documentação do *software DesignBuilder*, que se baseia em dados da ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (DESIGNBUILDER, [s.d.]; DORNELLES, 2008; MENDONÇA, 2005). As informações inseridas a esse respeito podem ser encontradas no Anexo A.

### 3.4.3 Configuração das aberturas

Nas aberturas, configuradas no menu “Openings”, usou-se o *Template* “Sgl Clr 6mm” para as janelas. Trata-se do vidro incolor de 6 mm de espessura, com valor de condutividade térmica ( $\lambda$ ) de 0,90 W/(m.K), e transmitância térmica (U) de 5,778 W/(m<sup>2</sup>.K), que são valores padrões do *DesignBuilder*. Como já descrito em 3.3, as aberturas das janelas, independentemente do tamanho do galpão, foram dimensionadas através de estudo de insolação, o que culminou nas seguintes proporções em relação à área de piso dos ambientes:

- Sala de produção: 20%;
- Sala de geminação: 16%;
- Sala de administração: 13,3%;
- Depósito: 11%;
- Banheiros: 16,5%.

**Tabela 2** - Resumo das informações inseridas no menu "Activity" do *DesignBuilder*.

Modelo	Ambiente	Template	Occupancy density	Schedule	Clo (verão)	Clo (inverno)	Target Illuminance	Computers	Office Equipment
Galpão 100 m <sup>2</sup>	Sala de produção	<i>Heavy Plant Room</i>	0,033	24 horas	0,6	0,8	3.268 lux	Desabilitado	Desabilitado
	Sala de geminação	<i>Heavy Plant Room</i>	0,1335	24 horas	0,6	0,8	3.268 lux	Desabilitado	Desabilitado
	Sala de administração	<i>24x7 Generic Office Area</i>	0,13	24 horas	0,6	0,8	400 lux	32,29 W/m <sup>2</sup>	53,93 W/m <sup>2</sup>
	Depósito	<i>Heavy Plant Room</i>	0,1510	24 horas	0,6	0,8	100 lux	Desabilitado	Desabilitado
	Circulação	<i>24x7 Circulation área (corridors and stairways)</i>	-----	-----	0,6	0,8	100 lux	Desabilitado	Desabilitado
	Banheiros	<i>24x7 Toilet</i>	-----	-----	0,6	0,8	200 lux	Desabilitado	Desabilitado
Galpão 300 m <sup>2</sup>	Sala de produção	<i>Heavy Plant Room</i>	0,018	24 horas	0,6	0,8	3.268 lux	Desabilitado	Desabilitado
	Sala de geminação	<i>Heavy Plant Room</i>	0,044	24 horas	0,6	0,8	3.268 lux	Desabilitado	Desabilitado
	Sala de administração	<i>24x7 Generic Office Area</i>	0,13	24 horas	0,6	0,8	400 lux	32,29 W/m <sup>2</sup>	53,93 W/m <sup>2</sup>
	Depósito	<i>Heavy Plant Room</i>	0,1510	24 horas	0,6	0,8	100 lux	Desabilitado	Desabilitado
	Circulação	<i>24x7 Circulation área (corridors and stairways)</i>	-----	-----	0,6	0,8	100 lux	Desabilitado	Desabilitado
	Banheiros	<i>24x7 Toilet</i>	-----	-----	0,6	0,8	200 lux	Desabilitado	Desabilitado
Galpão 500 m <sup>2</sup>	Sala de produção	<i>Heavy Plant Room</i>	0,015	24 horas	0,6	0,8	3.268 lux	Desabilitado	Desabilitado
	Sala de geminação	<i>Heavy Plant Room</i>	0,0267	24 horas	0,6	0,8	3.268 lux	Desabilitado	Desabilitado
	Sala de administração	<i>24x7 Generic Office Area</i>	0,13	24 horas	0,6	0,8	400 lux	32,29 W/m <sup>2</sup>	53,93 W/m <sup>2</sup>
	Depósito	<i>Heavy Plant Room</i>	0,1510	24 horas	0,6	0,8	100 lux	Desabilitado	Desabilitado
	Circulação	<i>24x7 Circulation área (corridors and stairways)</i>	-----	-----	0,6	0,8	100 lux	Desabilitado	Desabilitado
	Banheiros	<i>24x7 Toilet</i>	-----	-----	0,6	0,8	200 lux	Desabilitado	Desabilitado

Fonte: Autor (2019).

As portas foram configuradas de acordo com os *Templates* de atividade usados, com o “*Schedule*” ininterrupto. Assim, a abertura média foi de 50% do total da área do vão e com 5% do tempo de funcionamento aberta (“*Schedule*” ininterrupto). O *DesignBuilder* não considera nos cálculos o material da porta, apenas a sua abertura (DESIGNBUILDER, [s.d.]).

O acesso entre a sala de produção e o corredor, assim como a troca de ar entre esses ambientes até a face interna da telha, acontece devido ao uso da ferramenta “*Hole*”. Essa ferramenta possui a função de criar aberturas internas ou externas em diferentes ambientes, com a finalidade de permitir a troca de calor, indicando alguma abertura ou a ligação entre ambientes (DESIGNBUILDER, [s.d.]). Tal ação permite que o programa entenda que o ar mais quente da sala de produção suba até a face interna da telha, culminando na troca de ar externa, pois as janelas foram posicionadas muito próximas à cobertura (Figuras 16 e 17).

#### 3.4.4 Configuração das luminárias

A configuração das luminárias acontece no menu “*Lighting*” do *DesignBuilder*. Mas, antes de se inserir os dados, deve-se escolher o tipo de luminária a ser implantada no projeto. Com base nas pesquisas de Bula et al. (1991) e Okamoto et al. (1997), que investigaram os efeitos de diferentes faixas dos níveis de PPFd vermelho e azul no crescimento da alface, optou-se pela luminária de LED *Philips Green Power*, com saída regular, para o desenvolvimento dessa pesquisa (Figura 21). Essa luminária possui potência máxima de 175 W e permite o uso das luzes nas cores vermelha e azul, com faixa espectral entre 400 nm e 800 nm e alta eficiência na conversão. Ela foi desenvolvida para o cultivo de hortaliças em ambientes fechados. Em sua instalação, a distância mínima do cultivo deve ser de 50 cm (PHILIPS, 2018).

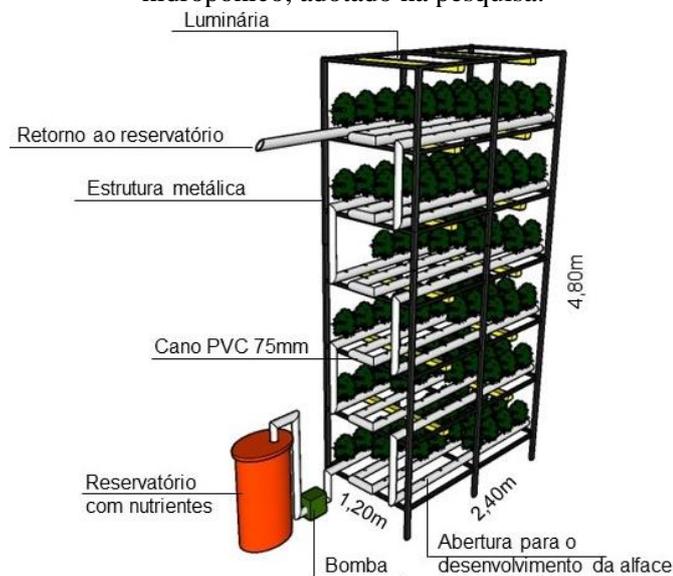
**Figura 21** - Luminária de LED *Philips Green Power*.



Fonte: Philips (2018).

O modelo de produção vertical escolhido foi o de “estrutura aramada com abordagem de fábrica”, trabalhado em módulos com medidas 1,20 m x 2,40 m x 4,80 m (Figuras 15 e 22). Esse modelo foi adotado porque, dentre os quatro tipos citados no Referencial Teórico, este obteve o melhor resultado, quando comparado os custos de implantação à produção/m<sup>2</sup> e à qualidade final do produto (HAYDEN, 2006; KATO et al., 2010; LINSLEY-NOAKES et al., 2006; MAHDAVI et al., 2012; NEOCLEOUS et al., 2010; TOULIATOS et al., 2016).

**Figura 22** - Perspectiva do módulo da "estrutura aramada com abordagem de fábrica", em sistema hidropônico, adotado na pesquisa.



Fonte: Autor (2019).

A altura das prateleiras, nos módulos, foi dimensionada para atender a distância mínima de instalação das luminárias diante das alfaces (50 cm), resultando em 6 (seis) prateleiras com espaçamento de 80 cm entre elas, para a sala de produção, e em 5 (cinco) prateleiras com espaçamento de 60 cm, para a sala de geminação.

Para quantificar as luminárias usadas em cada galpão foi necessário calcular a área total da fileira padrão (Figura 15) de cada patamar de prateleiras, de um total de 6 ou 5 patamares – de acordo com o ambiente - seguindo a Equação (1).

$$A_{tf} = 1,20 \times M_{lf} \quad (1)$$

Onde:

$A_{tf}$  – Área total da fileira padrão de módulos (m<sup>2</sup>);

$M_{lf}$  – Medida linear da fileira padrão (m).

Esse resultado e o valor do nível de iluminância (3.268 lux) foram inseridos na Equação (2), com a finalidade de identificar o fluxo luminoso necessário a cada fileira padrão de módulos (KANG et al., 2013; NOGUEIRA, 2011).

$$F_l = N_i \times A_{tf} \quad (2)$$

Onde:

$F_l$  – Fluxo luminoso (lm);

$N_i$  – Nível de iluminância (lx);

$A_{tf}$  – Área total da fileira padrão de módulos (m<sup>2</sup>).

Com o valor do fluxo luminoso foi possível encontrar o PPF (Fluxo de Fótons Fotossintéticos) de cada ambiente, através de calculadora de conversão (WAVEFORM LIGHTING, [s.d.]). Assim, sabendo que cada luminária possui um PPF de 520  $\mu\text{mol/s}$  (PHILIPS, 2018), o dimensionamento das luminárias para cada fileira padrão de módulos foi estabelecido pela Equação (3).

$$N_l = PPF_f / PPF_{lum} \quad (3)$$

Onde:

$N_l$  – Número de luminárias para cada fileira padrão de módulos;

$PPF_f$  – Fluxo de Fótons Fotossintéticos da fileira padrão ( $\mu\text{mol/s}$ );

$PPF_{lum}$  – Fluxo de Fótons Fotossintéticos da luminária ( $\mu\text{mol/s}$ ).

Por último, calculou-se a quantidade total de luminárias do ambiente através da Equação (4).

$$N_{tl} = N_l \times N_p \times N_{fp} \quad (4)$$

Onde:

$N_{tl}$  – Número total de luminárias para o ambiente;

$N_l$  – Número de luminárias para cada fileira padrão de módulos;

$N_p$  – Número de patamares dos módulos;

$N_{fp}$  – Número de fileiras padrão.

Expostos esses dados, para melhor compreensão, fez-se necessário descrever as configurações inseridas no menu “*Lighting*” de cada ambiente, separadamente.

#### 3.4.4.1 *Sala de produção*

As configurações de luminárias foram inseridas com base no tamanho de cada galpão: 100 m<sup>2</sup>, 300 m<sup>2</sup> e 500 m<sup>2</sup>. O número de luminárias foi estabelecido através das Equações (1), (2), (3) e (4).

##### 3.4.4.1.1 *Galpão de 100 m<sup>2</sup>*

Primeiramente, foi necessário calcular a área total da fileira padrão, através da Equação (1).

$$A_{tf} = 1,20 \times M_{lf} \quad (1)$$

$$A_{tf} = 1,20 \times 8,4$$

$$A_{tf} = 10,08 \text{ m}^2$$

Com a área da fileira padrão foi possível encontrar o valor do fluxo luminoso, por meio da Equação (2).

$$F_l = 3.268 \times 10,08 \quad (2)$$

$$F_l = 32.941,44 \text{ lm}$$

Na conversão, para lâmpada de LED com cores vermelha e azul e faixa espectral entre 450 nm e 650 nm, 32.941,44 lumens equivalem a um PPF de 2.922,92  $\mu\text{mol/s}$  (WAVEFORM LIGHTING, [s.d.]). Assim, deu-se continuidade na Equação (3).

$$N_l = PPF_f / PPF_{lum} \quad (3)$$

$$N_l = 2.922,92 / 520$$

$$N_l = 5,62$$

$$N_l = 6 \text{ luminárias}$$

Por último, calculou-se a quantidade de luminárias necessárias para entregar 3.268 lux em todo o ambiente, Equação (4).

$$N_{tl} = N_l \times N_p \times N_{fp} \quad (4)$$

$$N_{tl} = 6 \times 6 \times 4,28$$

$$N_{tl} = 154,08$$

$$N_{tl} = 155 \text{ luminárias}$$

Logo, o número total de luminárias que é necessário para entregar um nível de iluminância de 3.268 lux para toda a sala de produção do galpão com área produtiva de 100 m<sup>2</sup> é de 155 (cento e cinquenta e cinco) luminárias.

#### 3.4.4.1.2 Galpão de 300 m<sup>2</sup>

De início, foi necessário calcular a área total da fileira padrão, através da Equação (1).

$$A_{tf} = 1,20 \times M_{lf} \quad (1)$$

$$A_{tf} = 1,20 \times 26$$

$$A_{tf} = 31,2 \text{ m}^2$$

Com a área total da fileira padrão foi possível encontrar o valor do fluxo luminoso, através da Equação (2).

$$F_l = 3.268 \times 31,2 \quad (2)$$

$$F_l = 101.961,6 \text{ lm}$$

Na conversão, para lâmpada de LED com cores vermelha e azul e faixa espectral entre 450 nm e 650 nm, 101.961,6 lumens equivalem a um PPF de 9.047,14 μmol/s (WAVEFORM LIGHTING, [s.d.]). Assim, deu-se continuidade na Equação (3).

$$N_l = PPF_f / PPF_{lum} \quad (3)$$

$$N_l = 9.047,14 / 520$$

$$N_l = 17,4$$

$$N_l = 18 \text{ luminárias}$$

Por último, calculou-se a quantidade de luminárias necessárias para entregar 3.268 lux em todo o ambiente.

$$N_{tl} = N_l \times N_p \times N_{fp} \quad (4)$$

$$N_{tl} = 18 \times 6 \times 4,55$$

$$N_{tl} = 491,4$$

$$N_{tl} = 492 \text{ luminárias}$$

Logo, o número total de luminárias que é necessário para entregar um nível de iluminância de 3.268 lux para toda a sala de produção do galpão com área produtiva de 300 m<sup>2</sup> é de 492 (quatrocentos e noventa e duas) luminárias.

#### 3.4.4.1.3 Galpão de 500 m<sup>2</sup>

Novamente, foi necessário calcular a área total da fileira padrão, através da Equação (1).

$$A_{tf} = 1,20 \times M_{lf} \quad (1)$$

$$A_{tf} = 1,20 \times 44,4$$

$$A_{tf} = 53,28 \text{ m}^2$$

Com a área total da fileira padrão foi possível encontrar o valor do fluxo luminoso, usando a Equação (2).

$$F_l = 3.268 \times 53,28 \quad (2)$$

$$F_l = 174.119,04 \text{ lm}$$

Na conversão, para lâmpada de LED com cores vermelha e azul e faixa espectral entre 450 nm e 650 nm, 174.119,04 lumens equivalem a um PPF de 15.449,73 μmol/s (WAVEFORM LIGHTING, [s.d.]). Assim, deu-se continuidade na Equação (3).

$$N_l = PPF_f / PPF_{lum} \quad (3)$$

$$N_l = 15.449,73 / 520$$

$$N_l = 29,71$$

$$N_l = 30 \text{ luminárias}$$

Por último, calculou-se a quantidade de luminárias necessárias para entregar 3.268 lux em todo o ambiente, Equação (4).

$$N_{tl} = N_l \times N_p \times N_{fp} \quad (4)$$

$$N_{tl} = 30 \times 6 \times 4,45$$

$$N_{tl} = 801 \text{ luminárias}$$

Logo, o número total de luminárias que é necessário para entregar um nível de iluminância de 3.268 lux para toda a sala de produção do galpão com área de 500 m<sup>2</sup> é de 801 (oitocentos e uma) luminárias.

#### 3.4.4.2 Sala de geminação

Para a sala de geminação, o mesmo *layout* das bandejas/prateleiras foi mantido em todos os tamanhos de galpão (fileira única ao longo do ambiente, com espessura de 1,20 m). Tal disposição permitiu que o cálculo do número total de luminárias fosse mais simplificado, multiplicando o número total de luminárias estimadas para o galpão de 100 m<sup>2</sup> pela divisão entre a área do galpão de 300 m<sup>2</sup> ou 500 m<sup>2</sup> e a área do galpão de 100 m<sup>2</sup>, conforme a Equação (5).

$$N_{tl} = N_{l100m^2} \times \left(\frac{A_{tg}}{100}\right) \quad (5)$$

Onde:

$N_{tl}$  – Número total de luminárias para o ambiente;

$N_{l100m^2}$  – Número total de luminárias para a sala de geminação do galpão de 100 m<sup>2</sup>;

$A_{tg}$  – Área total do galpão (m<sup>2</sup>).

Mas antes, como na sala de produção, foi necessário encontrar o número total de luminárias para a sala de geminação do galpão de 100 m<sup>2</sup>. Logo, foi necessário calcular a área total da fileira, através da Equação (1).

$$A_{tf} = 1,20 \times M_{lf} \quad (1)$$

$$A_{tf} = 1,20 \times 4$$

$$A_{tf} = 4,8 \text{ m}^2$$

Com a área total da fileira foi possível encontrar o valor do fluxo luminoso, através da Equação (2).

$$F_l = 3.268 \times 4,8 \quad (2)$$

$$F_l = 15.686,4 \text{ lm}$$

Na conversão, para lâmpada de LED com cores vermelha e azul e faixa espectral entre 450 nm e 650 nm, 15.686,4 lumens equivalem a um PPF de 1.391,87  $\mu\text{mol/s}$  (WAVEFORM LIGHTING, [s.d.]). Assim, deu-se continuidade na Equação (3).

$$N_l = PPF_f / PPF_{lum} \quad (3)$$

$$N_l = 1.391,87 / 520$$

$$N_l = 2,67$$

$$N_l = 3 \text{ luminárias}$$

Por último, calculou-se a quantidade de luminárias necessárias para entregar 3.268 lux em todo o ambiente, por meio da Equação (4).

$$N_{tl} = N_l \times N_p \times N_{fp} \quad (4)$$

$$N_{tl} = 3 \times 5 \times 1$$

$$N_{tl} = 15 \text{ luminárias}$$

Logo, o número total de luminárias que é necessário para entregar um nível de iluminância de 3.268 lux para toda a sala de geminação do galpão com área produtiva de 100  $\text{m}^2$  é de 15 (quinze) luminárias.

Assim, pôde-se quantificar as luminárias necessárias para a sala de geminação dos galpões de 300  $\text{m}^2$  e 500  $\text{m}^2$ , através da Equação (5).

- Galpão de 300  $\text{m}^2$ :

$$N_{tl} = N_{l100m^2} \times \left(\frac{A_{tg}}{100}\right) \quad (5)$$

$$N_{tl} = 15 \times \left(\frac{300}{100}\right)$$

$$N_{tl} = 45 \text{ luminárias}$$

- Galpão de 500  $\text{m}^2$ :

$$N_{tl} = N_{l100m^2} \times \left(\frac{A_{tg}}{100}\right) \quad (5)$$

$$N_{tl} = 15 \times \left(\frac{500}{100}\right)$$

$$N_{tl} = 75 \text{ luminárias}$$

Então, chegou-se a um total de 45 (quarenta e cinco) luminárias para a sala de geminação do galpão com 300 m<sup>2</sup> de área produtiva e 75 (setenta e cinco) luminárias para a sala de geminação do galpão com 500 m<sup>2</sup> de área produtiva.

Obtidas essas informações, foi possível inserir os dados no menu “*Lighting*” do *DesignBuilder*. Primeiramente, o *Template* de iluminação foi selecionado. Para a sala de administração, o depósito, a circulação e os banheiros foi escolhido o *Template* “*LED*”, que se trata do uso de lâmpadas de LED. Para as salas de produção e de geminação o *Template* selecionado foi o “*LED with linear control*”, visto que se trata do uso de LEDs com um controle de fotoperíodo 6/2, configurado em “*Schedule*”. Os “*Schedules*” dos ambientes onde não há produção ou desenvolvimento do cultivo foram mantidos com o valor padrão do *Template*. O funcionamento do fotoperíodo 6/2 ocorre da seguinte forma: as lâmpadas são ligadas nos períodos entre 05:00 horas - 11:00 horas, 13:00 horas - 19:00 horas e 21:00 horas – 03:00 horas. Isso para evitar o uso de energia elétrica em parte do horário de pico (KANG et al., 2013; OLIVEIRA, 2017).

Em “*General Lighting*” o *DesignBuilder* estabelece que o valor de “*Normalised power density*” deve seguir a Equação (6).

$$NPD = \frac{\left(\frac{P_l \times N_{tl}}{A_a}\right)}{\left(\frac{N_i}{100}\right)} \quad (6)$$

Onde:

*NPD* – *Normalised power density* (W/m<sup>2</sup>-100 lux);

*P<sub>l</sub>* – Potência da luminária (W);

*N<sub>tl</sub>* – Número total de luminárias no ambiente;

*A<sub>a</sub>* – Área do ambiente (m<sup>2</sup>);

*N<sub>i</sub>* – Nível de iluminância do ambiente (lx).

### 3.4.4.3 Cálculo do valor de “*Normalised power density*”

Assim, convém mostrar o cálculo do “*Normalised power density*” nos ambientes produtivos de forma separada, para cada tamanho de galpão, através da Equação (6).

#### 3.4.4.3.1 Galpão de 100 m<sup>2</sup>

- Sala de produção: como esse ambiente possui pé direito duplo, a quantidade de luminárias do ambiente (155 luminárias) foi dividida por 2 (dois) e a parte mais alta foi renomeada como mezanino - os valores de configuração de “*Lighting*” no

mezanino foram copiados da sala de produção - assim, as luminárias foram simuladas em todo o pé direito duplo do galpão.

$$NPD = \frac{\left(\frac{P_l \times N_{tl}}{A_a}\right)}{\left(\frac{N_i}{100}\right)} = \frac{\left(\frac{175 \times 78}{91,63}\right)}{\left(\frac{3.268}{100}\right)} = \frac{148,97}{32,68} = 4,56 \frac{W}{m^2} - 100 \text{ lux}$$

- Sala de geminação:

$$NPD = \frac{\left(\frac{P_l \times N_{tl}}{A_a}\right)}{\left(\frac{N_i}{100}\right)} = \frac{\left(\frac{175 \times 15}{7,49}\right)}{\left(\frac{3.268}{100}\right)} = \frac{350,47}{32,68} = 10,72 \frac{W}{m^2} - 100 \text{ lux}$$

Logo, os valores de “*Normalised power density*” para a sala de produção/mezanino e a sala de geminação no galpão com 100 m<sup>2</sup> de área produtiva são de, respectivamente, 4,56 W/m<sup>2</sup>-100 lux e 10,72 W/m<sup>2</sup>-100 lux.

#### 3.4.4.3.2 Galpão de 300 m<sup>2</sup>

- Sala de produção: mais uma vez, como a sala de produção possui pé direito duplo, a quantidade de luminárias do ambiente (492 luminárias) foi dividida por 2 (dois) e a parte mais alta foi renomeada como mezanino - os valores de configuração de “*Lighting*” em mezanino foram novamente copiados da sala de produção - assim, as luminárias foram simuladas em todo o pé direito duplo do galpão.

$$NPD = \frac{\left(\frac{P_l \times N_{tl}}{A_a}\right)}{\left(\frac{N_i}{100}\right)} = \frac{\left(\frac{175 \times 246}{275,48}\right)}{\left(\frac{3.268}{100}\right)} = \frac{156,27}{32,68} = 4,78 \frac{W}{m^2} - 100 \text{ lux}$$

- Sala de geminação:

$$NPD = \frac{\left(\frac{P_l \times N_{tl}}{A_a}\right)}{\left(\frac{N_i}{100}\right)} = \frac{\left(\frac{175 \times 45}{22,48}\right)}{\left(\frac{3.268}{100}\right)} = \frac{350,31}{32,68} = 10,72 \frac{W}{m^2} - 100 \text{ lux}$$

Logo, os valores de “*Normalised power density*” para a sala de produção/mezanino e a sala de geminação no galpão com 300 m<sup>2</sup> de área produtiva são de, respectivamente, 4,78 W/m<sup>2</sup>-100 lux e 10,72 W/m<sup>2</sup>-100 lux.

### 3.4.4.3.3 Galpão de 500 m<sup>2</sup>

- Sala de produção: com o pé direito duplo da sala de produção, a quantidade de luminárias do ambiente (801 luminárias) foi dividida por 2 (dois) e a parte mais alta foi renomeada como mezanino - os valores de configuração de “*Lighting*” em mezanino foram copiados da sala de produção - assim, as luminárias foram simuladas em todo o pé direito duplo do galpão.

$$NPD = \frac{\left(\frac{P_l \times N_{tl}}{A_a}\right)}{\left(\frac{N_i}{100}\right)} = \frac{\left(\frac{175 \times 401}{459,34}\right)}{\left(\frac{3.268}{100}\right)} = \frac{152,77}{32,68} = 4,67 \frac{W}{m^2} - 100 \text{ lux}$$

- Sala de geminação:

$$NPD = \frac{\left(\frac{P_l \times N_{tl}}{A_a}\right)}{\left(\frac{N_i}{100}\right)} = \frac{\left(\frac{175 \times 75}{37,47}\right)}{\left(\frac{3.268}{100}\right)} = \frac{350,28}{32,68} = 10,72 \frac{W}{m^2} - 100 \text{ lux}$$

Logo, os valores de “*Normalised power density*” para a sala de produção/mezanino e a sala de geminação no galpão com 500 m<sup>2</sup> de área produtiva são de, respectivamente, 4,67 W/m<sup>2</sup>-100 lux e 10,72 W/m<sup>2</sup>-100 lux.

Para os demais ambientes (depósito, sala de administração, circulação e banheiros), os valores de “*Normalised power density*” foram mantidos de acordo com os *Templates* de “*Activity*” e “*Lighting*”.

Ainda no menu “*Lighting*” do *Designbuilder*, em “*Lighting Control*” os valores de “*Working plane height (m)*” – Altura do plano de trabalho – foram estabelecidos de acordo com a altura das prateleiras das áreas produtivas, isto é, 80 cm para a sala de produção e 60 cm para a sala de geminação. Para os demais ambientes, os valores do *Template* foram mantidos.

Para melhor compreensão, os dados inseridos no menu “*Lighting*” do *DesignBuilder* foram listados na Tabela 3.

**Tabela 3** - Resumo das informações inseridas no menu "Lighting" do *DesignBuilder*.

Modelo	Ambiente	Template	Número de luminárias	Normalised power density	Schedule	Altura do plano de trabalho (m)
Galpão 100 m <sup>2</sup>	Sala de produção	<i>LED with linear control</i>	78	4,56 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 6/2	0,8
	Mezanino	<i>LED with linear control</i>	78	4,56 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 6/2	0,8
	Sala de geminação	<i>LED with linear control</i>	15	10,72 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 6/2	0,6
	Sala de administração	<i>LED</i>	-----	-----	24 horas	-----
	Depósito	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----
	Circulação	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----
	Banheiros	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----
Galpão 300 m <sup>2</sup>	Sala de produção	<i>LED with linear control</i>	246	4,78 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 6/2	0,8
	Mezanino	<i>LED with linear control</i>	246	4,78 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 6/2	0,8
	Sala de geminação	<i>LED with linear control</i>	45	10,72 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 6/2	0,6
	Sala de administração	<i>LED</i>	-----	-----	24 horas	-----
	Depósito	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----
	Circulação	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----
	Banheiros	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----
Galpão 500 m <sup>2</sup>	Sala de produção	<i>LED with linear control</i>	401	4,67 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 6/2	0,8
	Mezanino	<i>LED with linear control</i>	401	4,67 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 6/2	0,8
	Sala de geminação	<i>LED with linear control</i>	75	10,72 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 6/2	0,6
	Sala de administração	<i>LED</i>	-----	-----	24 horas	-----
	Depósito	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----
	Circulação	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----
	Banheiros	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----

Fonte: Autor (2019).

### 3.4.5 Configuração do sistema HVAC

Para o sistema HVAC (*Heating, Ventilating and Air-Conditioning*), os dados foram inseridos com a finalidade de gerar 3 (três) resultados distintos para cada modelo. Independentemente do tamanho do galpão, o depósito, a circulação e os banheiros foram mantidos apenas com a ventilação natural, sem o uso de condicionador de ar. A sala de administração foi mantida com o funcionamento de condicionador de ar, seguindo o que dispõe o Item 3.4.1.3. Para as salas de produção e geminação, o sistema HVAC foi simulado com três cenários distintos: 1) apenas ventilação natural, 2) apenas com condicionador de ar com controle de temperatura a 30 °C, 3) apenas com condicionador de ar com controle de temperatura a 24 °C (MAYNARD; HOCHMUTH, 2007; SGANZERLA, 1990).

A configuração do sistema HVAC para os ambientes que fazem uso da ventilação natural foi realizada desabilitando a função “*Cooled*”, em “*Cooling*”, e habilitando a função “*Natural Ventilation*”. O valor de “*Outside air (ac/h)*” – troca de ar interna a cada hora – foi estabelecido em 5 (cinco), sendo este valor considerado o ideal para se manter um ambiente com boa salubridade (ABNT NBR 15575, 2013).

Para os ambientes com uso de condicionador de ar, o *Template* “*Split no fresh air*” (condicionador de ar *Split* sem renovação de ar) foi selecionado. Trata-se do tipo de condicionador de ar mais utilizado no Brasil (SILVA, 2019).

O modelo escolhido para a simulação das salas de produção e geminação foi o condicionador de ar de teto Samsung AC048JNCDKC/VN (Figura 23) - que possui o CoP (Coeficiente de Performance) de 3,26 W/W – etiqueta A em eficiência energética (INMETRO, 2017). O “*Schedule*” do uso de condicionador de ar para esses ambientes foi configurado para ocupação ininterrupta. Assim, sempre que a temperatura ultrapassar o valor estabelecido, o condicionador de ar irá atuar para manter a temperatura configurada para o ambiente.

**Figura 23** – Condicionador de ar de teto Samsung usado na simulação.



Fonte: Samsung (s.d.).

### **3.5 DESCRIÇÃO DO SISTEMA HIDROPÔNICO**

Para o sistema hidropônico, o reservatório deve ter em seu interior uma solução nutritiva nacional - observa-se que as soluções estudadas no Referencial Teórico são importadas e, provavelmente, essa opção iria gerar um maior custo de operação.

Para condução da solução nutricional podem ser utilizados tubos de PVC (Policloreto de Polivinila), diâmetro de 75 mm, com aberturas para fixação de recipientes plásticos (volume aproximado de 180 ml), que devem conter uma espuma fenólica com a semente da alface geminada. Além disso, as aberturas devem ser espaçadas 30 cm uma da outra devido ao raio de desenvolvimento da alface (BOARETTO, 2004). Esses recipientes plásticos precisam ser furados em sua base inferior e depositados nas aberturas dos canos de PVC. Esse furo permite que a solução nutritiva entre no recipiente e encharque a espuma fenólica, que é responsável por armazenar e nutrir o cultivo, desde a semeadura (Figura 22).

A circulação da solução pelos tubos de PVC acontece através do funcionamento de um conjunto moto-bomba de 372,85 W (o equipamento com essa potência pode elevar a solução à uma altura manométrica de até 26 m, com vazão ultrapassando 33 litros/minuto), controlada por um temporizador, com circulação por 15 minutos e intervalos de, também, 15 minutos durante o dia (06:00 h às 18:00 h). Durante a noite, permanece ligado durante 15 minutos, às 22:00 h e às 02:00 h (MARTINS, [s.d.]; OHSE et al., 2001).

Como já informado, o conjunto moto-bomba foi estimado em uma posição externa à edificação, para evitar o aumento da carga térmica interna ao galpão. Porém, seu consumo energético foi considerado e adicionado no valor final de consumo mensal do edifício.

Além disso, como o próprio sistema de circulação de água do sistema hidropônico pode auxiliar na taxa de umidade relativa do ar, desprezou-se o controle de umidade ambiental durante o processo de simulação.

### **3.6 ESTUDO DE AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (PÓS-SIMULAÇÃO)**

Após a simulação do galpão industrial, sentiu-se a necessidade de realizar um estudo sobre possíveis soluções de eficiência energética com a finalidade de quantificar a economia no consumo de energia elétrica para a atividade agrícola verticalizada no galpão modelado. Como esse estudo só foi possível após a obtenção dos resultados da simulação térmica e energética, a descrição das ações de eficiência energética para a Fazenda Vertical trabalhada foi descrita no Item 4.3.

### 3.7 USO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAÍCOS

As simulações no *software Designbuilder* trouxeram como dados de saída o consumo energético e as informações de conforto térmico do edifício. Com o total do consumo de energia elétrica calculado, foi possível estabelecer se, para cada simulação, a área de cobertura voltada ao Norte é capaz de suportar a quantidade de placas fotovoltaicas necessária para suprir a demanda total/parcial de energia elétrica do galpão (AL-CHALABI, 2015).

As coberturas, com face direcionadas ao Norte, seguem as seguintes dimensões, baseadas em cada modelo de galpão:

- Galpão de 100 m<sup>2</sup>: 6,47 m x 14,84 m;
- Galpão de 300 m<sup>2</sup>: 6,47 m x 34,84 m;
- Galpão de 500 m<sup>2</sup>: 6,47 m x 54,84 m.

A placa fotovoltaica definida para a estimativa foi o Painel Solar Yingli YL330P-35B (Figura 24). Esse modelo de painel possui uma potência de 330 W - tolerância de 5 W para mais ou para menos – com 72 (setenta e duas) células de silício policristalino, além de uma eficiência de 17% na conversão. Cada unidade pode gerar até 1.113 Wh/dia. Suas dimensões são: 1,96 m x 0,992 m x 0,04 m (NEOSOLAR, [s.d.]).

**Figura 24** - Painel solar Yingli YL330P-35B.



Fonte: NeoSolar (s.d.).

Com esses dados, o dimensionamento das placas nas faces das coberturas supracitadas pôde ser realizado, através da Equação (7).

$$N_{tp} = \left( \frac{6,47}{A_p} \right) \times \left( \frac{C_c}{B_p} \right) \quad (7)$$

Onde:

$N_{tp}$  – Número total de painéis na cobertura;

$A_p$  – Altura do painel (m);

$B_p$  – Base do painel (m);

$C_c$  – Comprimento do maior lado da cobertura (m).

Assim, através da Equação (8), foi possível verificar o potencial de geração anual de energia elétrica pelo uso de painéis fotovoltaicos posicionados na superfície da cobertura direcionada ao Norte dos modelos simulados.

$$P_{ef} = N_{tp} \times (P_p \times 365) \quad (8)$$

Onde:

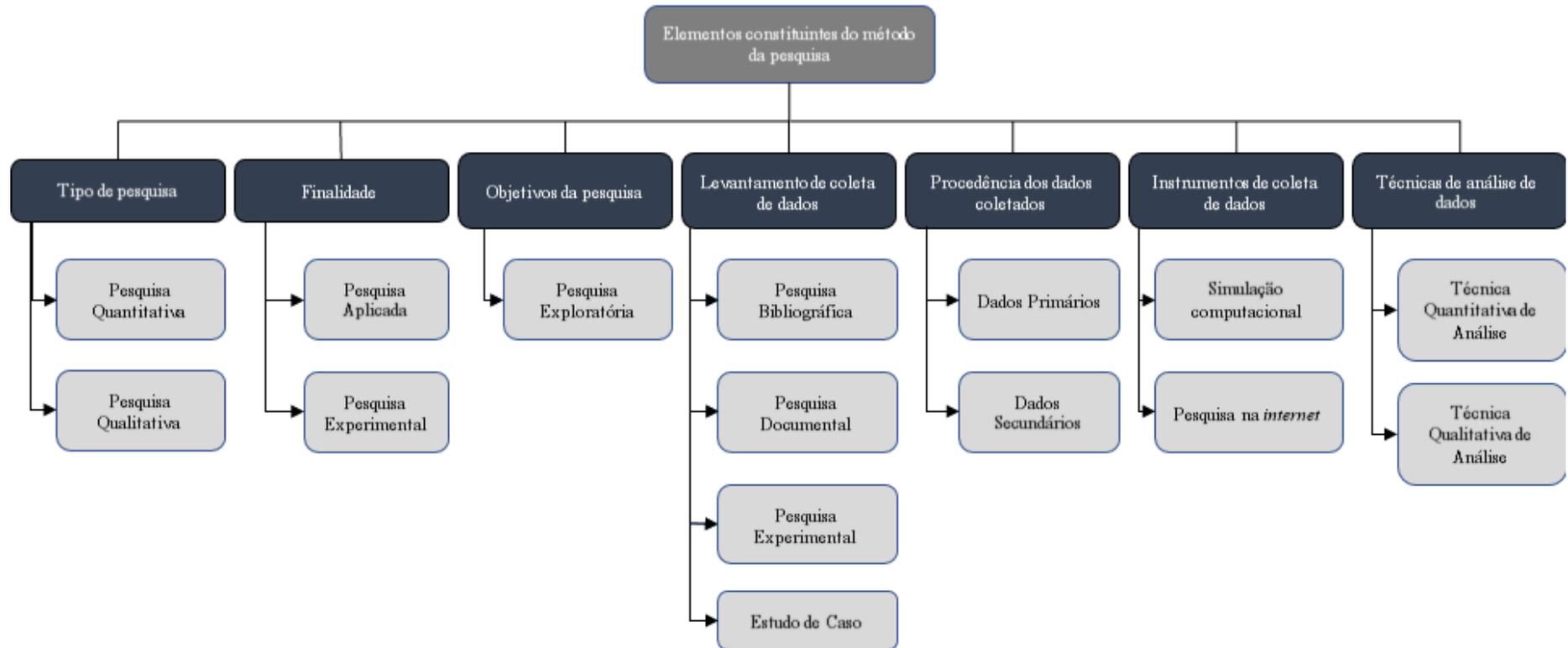
$P_{ef}$  – Potencial de geração anual de energia elétrica fotovoltaica (kWh/ano);

$N_{tp}$  – Número total de painéis na cobertura;

$P_p$  – Potência do painel (kWh).

Após, pôde-se verificar se o uso de painéis fotovoltaicos seria capaz de reduzir, consideravelmente, o consumo de energia elétrica da concessionária de energia local. A análise foi realizada através da comparação entre o potencial de produção de energia dos painéis e o consumo energético de cada modelo de galpão, onde o cultivo pode ser produzido.

**Figura 25** - Fluxograma dos elementos constituintes do método da pesquisa.



Fonte: Adaptado de Gil (2002) e Lakatos e Marconi (1992).

## 4 RESULTADOS

Por conta dos procedimentos metodológicos aplicados, e análises decorrentes, os resultados foram divididos em cinco seções: 1) Revisão Sistemática, 2) Simulação, 3) Estudo de ações de eficiência energética, 4) Simulações com o Cenário 3 e 5) Painéis fotovoltaicos.

### 4.1 REVISÃO SISTEMÁTICA

Com a realização da busca no banco de dados *Scopus*, conforme descrito em 3.1, foram identificados 14 (quatorze) trabalhos (Quadro 3). Após a leitura aleatória dos títulos, resumos e palavras-chave, selecionou-se 12 (doze) pesquisas para leitura completa (Quadro 4). Destes, 8 (oito) artigos foram excluídos (Quadro 5). Assim, restaram 4 (quatro) pesquisas, que foram incluídas por abordarem sobre o uso/consumo de energia em Fazendas Verticais (Quadro 6).

**Quadro 3** - Trabalhos encontrados no banco de dados *Scopus*.

Ano	Autor(es)	Título
2011	Romulus Gruia	<i>Study on energy resources integration and sustainability of the new modular agriculture pattern.</i>
2013	Jie He e Singkong Lee	<i>Impact of climate change on food security and proposed solutions for the modern city.</i>
2013	Silvia Burés	<i>A view beyond traditional growing media uses.</i>
2014	S.Sivamani, K. Kwak e Y. Cho	<i>A design of web-based services using RESTful API for vertical farm.</i>
2016	C. C. S. Nicole et al.	<i>Lettuce growth and quality optimization in a plant factory.</i>
2016	Kale H. Harbick e Louis D. Albright	<i>Comparison of energy consumption: Greenhouses and plant factories.</i>
2017	Khadija Benis, Christoph Reinhart e Paulo Ferrão	<i>Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of Building-Integrated Agriculture (BIA) in urban contexts.</i>
2017	Luuk Graamans, Andy van den Dobbelsteen, Esther Meinen e Cecilia Stanghellini	<i>Plant factories; crop transpiration and energy balance.</i>
2017	Jie, He	<i>Integrated vertical aeroponic farming systems for vegetable production in space limited environments.</i>
2018	Yanko Aleksandrov	<i>New solution: Cultivation and storage of soft fruits and vegetables in volumes, situated on rotating rings, and irrigated by a system that uses condensed mist moisture (in super skyscraper, London).</i>
2018	Luuk Graamans et al.	<i>Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency.</i>
2018	David Sanjuan-Delmás et al.	<i>Environmental assessment of an integrated rooftop greenhouse for food production in cities.</i>
2018	Vaclav Smil	<i>It'll be harder than we thought to get the carbon out (Blueprints for a Miracle).</i>
2018	Harry Goldstein	<i>The green promise of vertical farms (Blueprints for a Miracle).</i>

Fonte: Autor (2019).

**Quadro 4** - Artigos selecionados para leitura completa.

Ano	Autor(es)	Título
2011	Romulus Gruia	<i>Study on energy resources integration and sustainability of the new modular agriculture pattern.</i>
2013	Silvia Burés	<i>A view beyond traditional growing media uses.</i>
2016	C. C. S. Nicole et al.	<i>Lettuce growth and quality optimization in a plant factory.</i>
2016	Kale H. Harbick e Louis D. Albright	<i>Comparison of energy consumption: Greenhouses and plant factories.</i>
2017	Khadija Benis, Christoph Reinhart e Paulo Ferrão	<i>Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of Building-Integrated Agriculture (BIA) in urban contexts.</i>
2017	Luuk Graamans, Andy van den Dobbelen, Esther Meinen e Cecilia Stanghellini	<i>Plant factories; crop transpiration and energy balance.</i>
2017	He Jie	<i>Integrated vertical aeroponic farming systems for vegetable production in space limited environments.</i>
2018	Yanko Aleksandrov	<i>New solution: Cultivation and storage of soft fruits and vegetables in volumes, situated on rotating rings, and irrigated by a system that uses condensed mist moisture (in super skyscraper, London).</i>
2018	Luuk Graamans et al.	<i>Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency.</i>
2018	David Sanjuan-Delmás et al.	<i>Environmental assessment of an integrated rooftop greenhouse for food production in cities.</i>
2018	Vaclav Smil	<i>It'll be harder than we thought to get the carbon out (Blueprints for a Miracle).</i>
2018	Harry Goldstein	<i>The green promise of vertical farms (Blueprints for a Miracle).</i>

Fonte: Autor (2019).

**Quadro 5 - Trabalhos excluídos.**

Ano	Título	Motivo da exclusão
2013	<i>A view beyond traditional growing media uses.</i>	Não aborda sobre o uso/consumo energético em Fazendas Verticais.
2016	<i>Lettuce growth and quality optimization in a plant factory.</i>	Trata sobre o efeito de LEDs na produtividade e na qualidade dos cultivos, não trata de energia.
2016	<i>Comparison of energy consumption: Greenhouses and plant factories.</i>	Dados incompletos. Não se trata de produção vertical.
2017	<i>Integrated vertical aeroponic farming systems for vegetable production in space limited environments.</i>	Disserta sobre o uso da aeroponia e faz experimentos com luzes de LED em produção vertical. Não aborda sobre o uso/consumo energético.
2018	<i>New solution: Cultivation and storage of soft fruits and vegetables in volumes, situated on rotating rings, and irrigated by a system that uses condensed mist moisture (in super skyscraper, London).</i>	Explica sobre um protótipo patenteado, mas pouco aborda o tema energia.
2018	<i>Environmental assessment of an integrated rooftop greenhouse for food production in cities.</i>	A produção não é verticalizada. Trata-se de um estudo em edifício vertical, mas com sistema hidropônico horizontal. Tema focado em avaliação ambiental.
2018	<i>It'll be harder than we thought to get the carbon out (Blueprints for a Miracle).</i>	Não aborda sobre o uso/consumo energético em Fazendas Verticais.
2018	<i>The green promise of vertical farms (Blueprints for a Miracle).</i>	Trata sobre impacto ambiental, mas não se aprofundo no tema energia.

Fonte: Autor (2019).

**Quadro 6 - Trabalhos incluídos.**

Ano	Autor(es)	Título
2011	Romulus Gruia	<i>Study on energy resources integration and sustainability of the new modular agriculture pattern.</i>
2017	Khadija Benis, Christoph Reinhart e Paulo Ferrão	<i>Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of Building-Integrated Agriculture (BIA) in urban contexts.</i>
2017	Luuk Graamans, Andy van den Dobbelsteen, Esther Meinen e Cecilia Stanghellini	<i>Plant factories; crop transpiration and energy balance.</i>
2018	Luuk Graamans et al.	<i>Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency.</i>

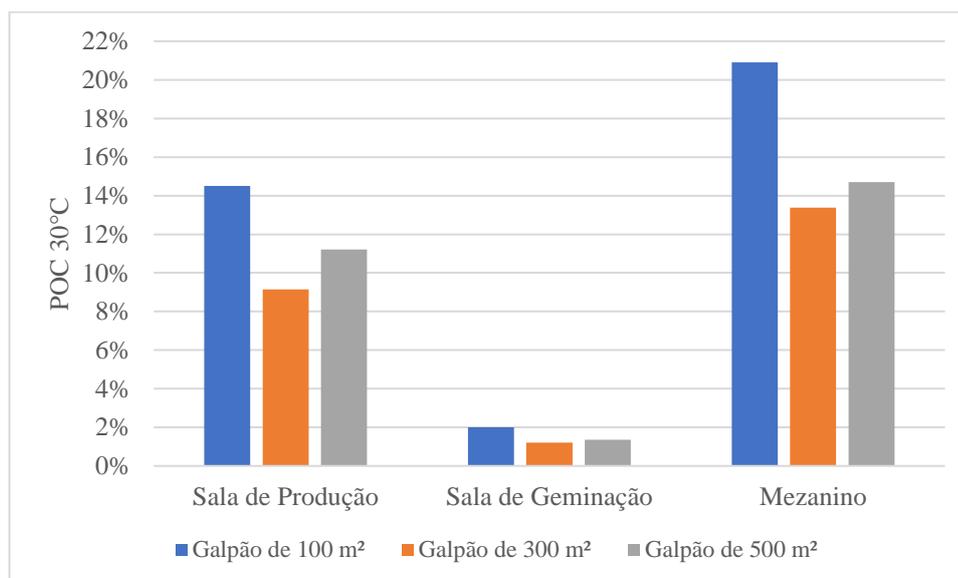
Fonte: Autor (2019).

Como os trabalhos citados já foram comentados no Capítulo 2, optou-se por não repetir as informações nesse Capítulo.

## 4.2 SIMULAÇÃO

O primeiro resultado que se obteve com a simulação no *software DesignBuilder* foi o Percentual anual de horas Ocupadas em Conforto (POC) das áreas produtivas (sala de produção, mezanino e sala de geminação) nos modelos com ventilação natural, adotando a temperatura máxima de 30 °C (Gráfico 1).

**Gráfico 1** - POC dos ambientes produtivos sob ventilação natural – 30 °C.



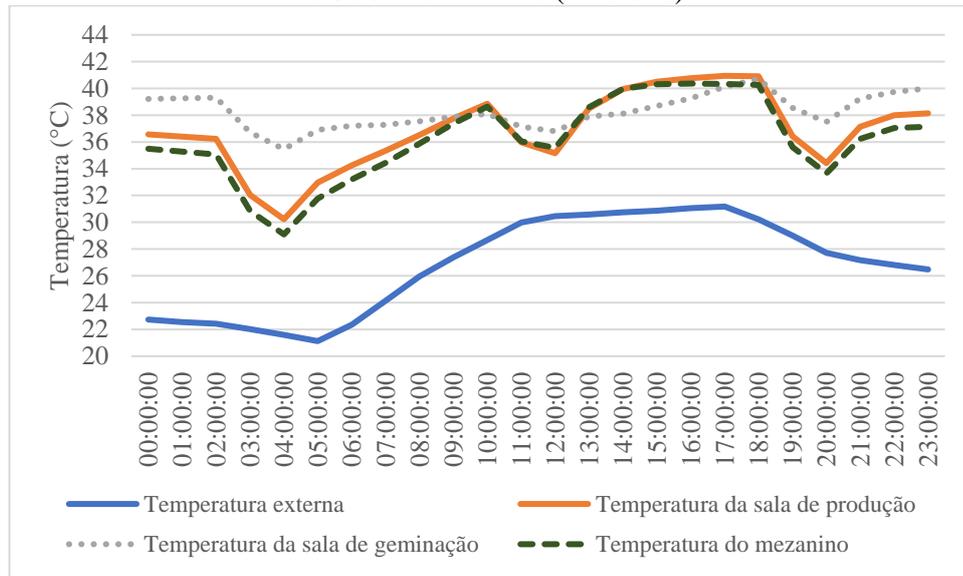
Fonte: Autor (2019).

No Gráfico 1, é possível observar que, quando em ventilação natural, o mezanino foi o ambiente que apresentou o melhor resultado em relação ao POC de 30 °C, independentemente do tamanho do galpão. Apesar do mezanino estar localizado em posição mais alta que as salas de produção e geminação, e por isso receber o ar mais quente que sobe dos demais ambientes, ele possui janelas que permitem a troca de ar com o ambiente externo.

A sala de geminação foi o ambiente que obteve o menor desempenho para arrefecimento sob ventilação natural. Por possuir um pé direito simples, com altura de 3 (três) metros, e um elevado ganho térmico, devido ao uso das luminárias, a sala de geminação obteve POC máximo de 2,00%, no galpão com 100 m² de área produtiva.

O ganho de temperatura deveu-se ao uso das luminárias. Apesar das paredes externas possuírem um alto valor de transmitância térmica - 3,737 W/(m².K), ver Anexo 1 – o “*Schedule*” inserido (fotoperíodo 6/2), o alto nível de iluminação entregue às plantas (3.268 lux) e, por consequência, o elevado número de luminárias foram, em maior importância, os responsáveis pelo aquecimento desses ambientes, como mostra o Gráfico 2.

**Gráfico 2** - Temperatura ambiental nas salas produtivas do galpão de 100 m<sup>2</sup> sob ventilação natural, no Solstício de Verão (dia 21/12).



Fonte: Autor (2019).

Como se pode observar no Gráfico 2, as temperaturas nas salas produtivas – que estão mais altas que na área externa – têm queda em três momentos ao longo do dia tomado como exemplo, Solstício de Verão (dia 21 de dezembro). Essas baixas na temperatura interna acontecem no momento em que as luminárias são desligadas para o descanso do cultivo, de acordo com o fotoperíodo de 6/2 (claro/escuro) inserido no programa, descrito no Item 3.4.4.

Ao elevar a temperatura das áreas produtivas, as luminárias também foram responsáveis pelo alto consumo energético do sistema de condicionamento mecânico de ar. Observa-se, no mesmo Gráfico, que pelo fato da temperatura ambiental estar sempre muito elevada (maior que 30 °C), o condicionador de ar precisa ser acionado durante grande parte do dia, independente da temperatura desejada, 24 °C ou 30 °C.

Com base na Equação 9, encontrou-se o consumo energético ocasionado pelo conjunto moto-bomba, que foi de 884,58 kWh/ano. Chegou-se a esse dado através das informações de potência da bomba (372,85 W) e do funcionamento do sistema hidropônico.

$$C_{mb} = (P_b \times T_h) \times 365 \quad (9)$$

Onde:

$C_{mb}$  – Consumo anual do conjunto moto-bomba (kWh);

$P_b$  – Potência da bomba (kW);

$T_h$  – Tempo diário de funcionamento da bomba (h).

$$C_{mb} = (P_b \times T_h) \times 365 \quad (9)$$

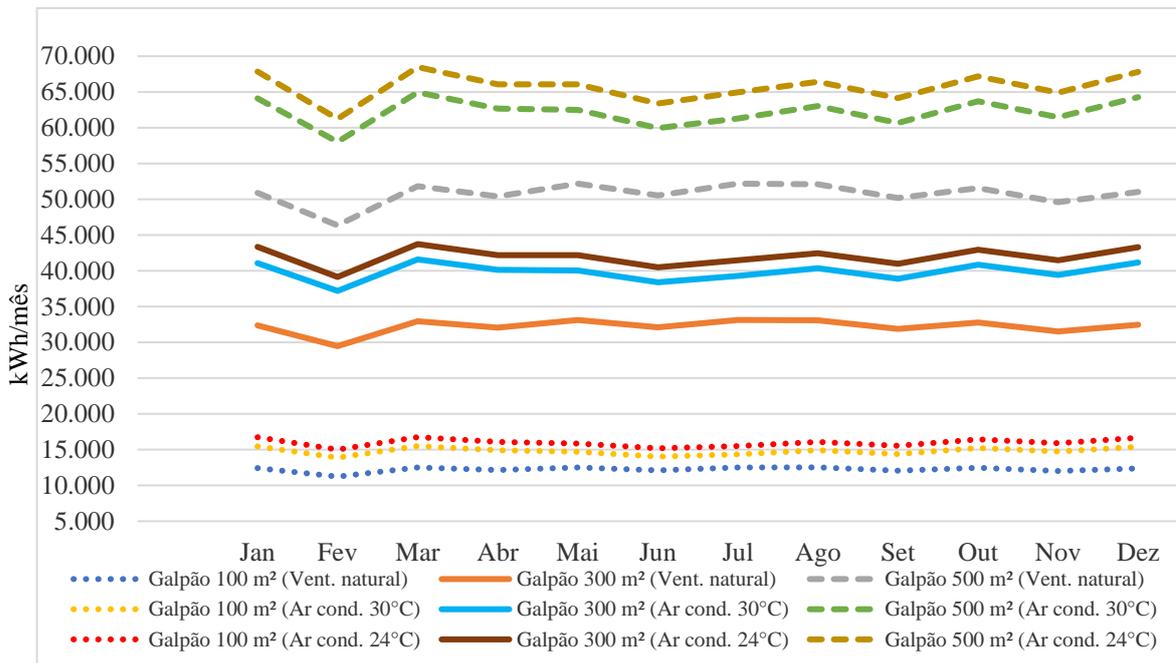
$$C_{mb} = (0,37285 \times 6,5) \times 365$$

$$C_{mb} = 2,4235 \times 365$$

$$C_{mb} = 884,58 \text{ kWh/ano}$$

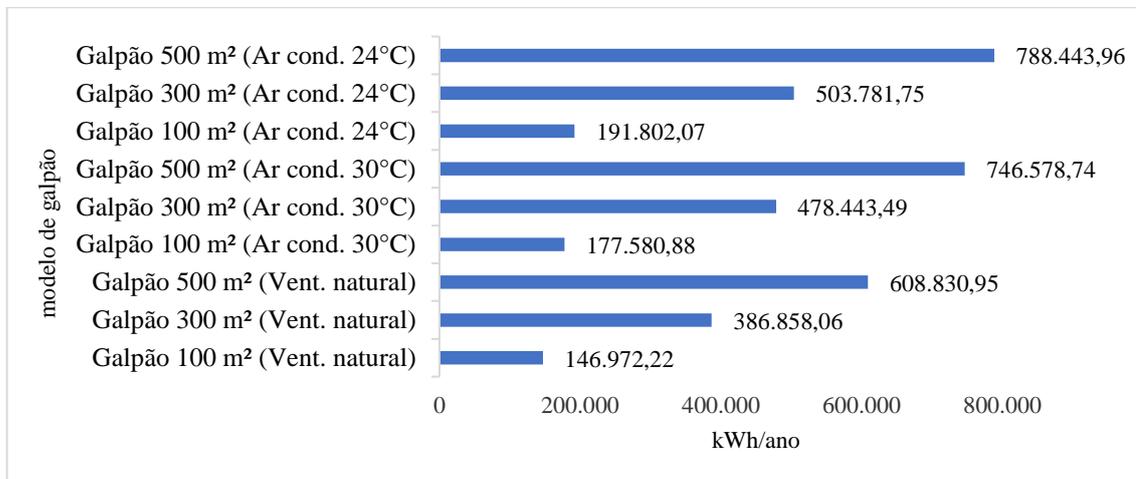
O valor do consumo do conjunto moto-bomba foi incluso no consumo total dos modelos simulados (Gráficos 3 e 4).

**Gráfico 3** - Consumo mensal de energia elétrica para cada modelo de galpão simulado (kWh/mês).



Fonte: Autor (2019).

**Gráfico 4** - Consumo anual de energia elétrica em cada modelo de galpão simulado (kWh/ano).



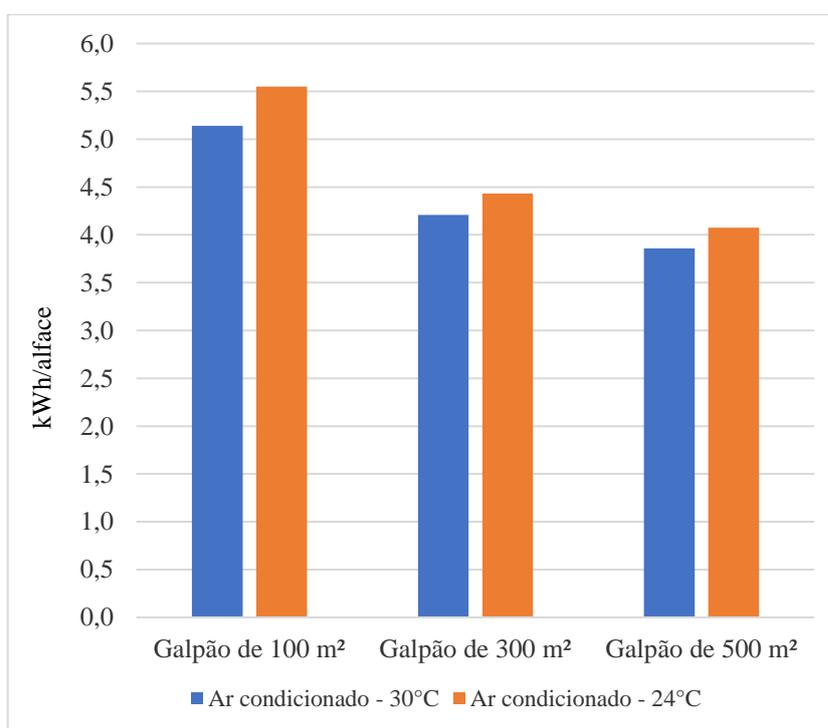
Fonte: Autor (2019).

Como mostra a Figura 22, cada módulo de desenvolvimento do cultivo possui o potencial de produção de 192 (cento e noventa e duas) unidades de alface. Com base na configuração dos módulos em cada modelo de edifício simulado (Figuras 13 e 15) e no que está descrito nos Itens 3.5 e 3.2.2, fez-se o levantamento do potencial produtivo anual de cada galpão.

- Galpão de 100 m<sup>2</sup>: 34.560 (trinta e quatro mil e quinhentos e sessenta) alfaces/ano;
- Galpão de 300 m<sup>2</sup>: 113.664 (cento e treze mil e seiscentos e sessenta e quatro) alfaces/ano;
- Galpão de 500 m<sup>2</sup>: 193.536 (cento e noventa e três mil e quinhentos e trinta e seis) alfaces/ano.

Assim, foi possível quantificar o consumo de energia elétrica necessário ao desenvolvimento de cada unidade de alface nos modelos onde o cultivo é possível - uso de condicionador de ar a 24 °C e a 30 °C (Gráfico 5).

**Gráfico 5** - Consumo de energia elétrica por unidade de alface (kWh/alface).



Fonte: Autor (2019).

O Gráfico 5 mostra que, em termos de kWh por unidade de alface produzido (kWh/alface), o galpão de 500 m<sup>2</sup> foi mais vantajoso, pois o consumo energético para cada

unidade da produção foi menor (3,86 kWh/alface para temperatura a 30 °C e 4,08 kWh/alface para temperatura a 24 °C).

Para melhor entendimento, fez-se oportuno criar a Tabela 4, que traz o resumo das informações adquiridas, resultantes das simulações aplicadas.

**Tabela 4** - Resumo dos resultados das simulações aplicadas.

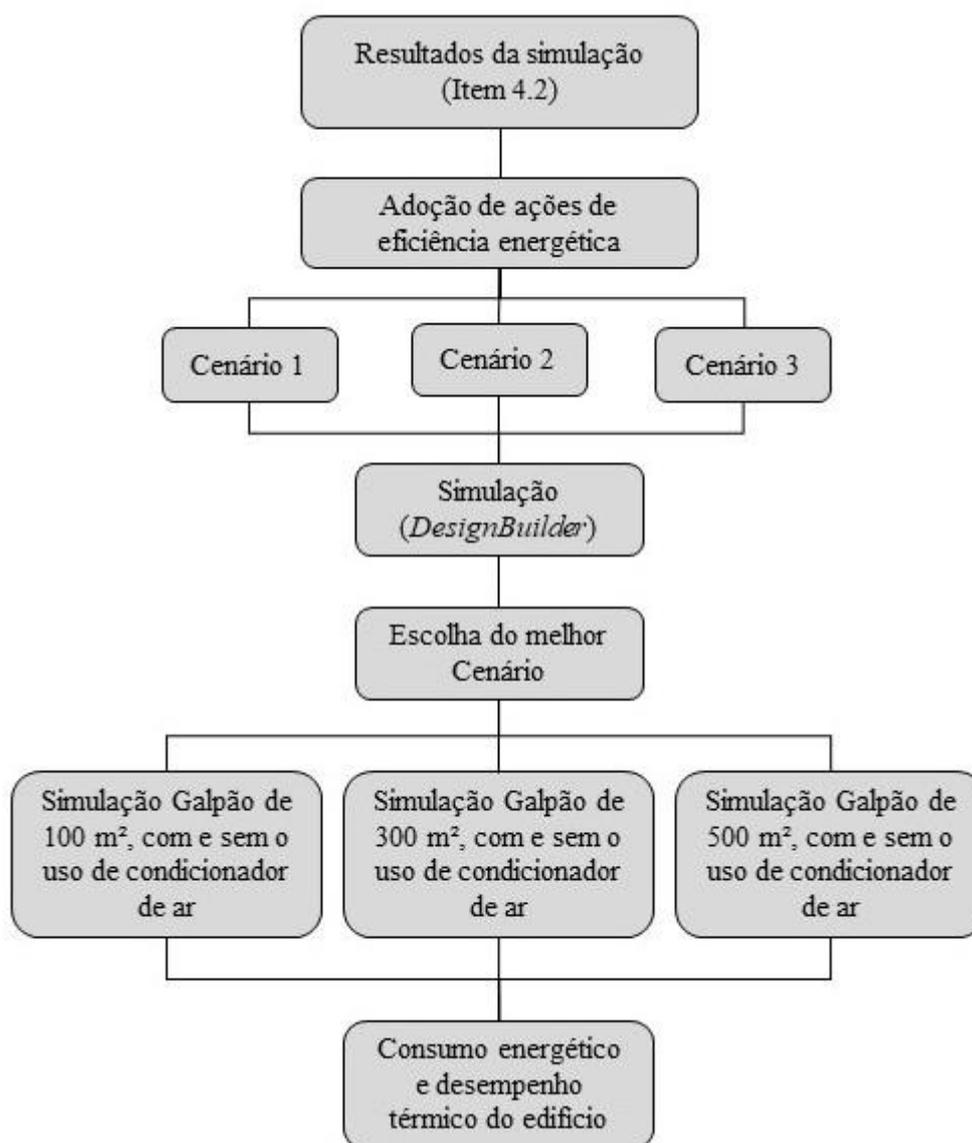
Modelo	Ambiente	POC 30 °C	Consumo total do edifício	Consumo por alface
Galpão 100 m <sup>2</sup> - Ventilação natural	Sala de produção	14,50%	146.972,22 kWh/ano	-----
	Mezanino	20,91%		
	Sala de geminação	2,00%		
Galpão 300 m <sup>2</sup> - Ventilação natural	Sala de produção	9,14%	386.858,06 kWh/ano	-----
	Mezanino	13,39%		
	Sala de geminação	1,21%		
Galpão 500 m <sup>2</sup> - Ventilação natural	Sala de produção	11,21%	608.830,95 kWh/ano	-----
	Mezanino	14,71%		
	Sala de geminação	1,35%		
Galpão 100 m <sup>2</sup> - Condicionador de ar a 30 °C	Sala de produção	-----	177.580,88 kWh/ano	5,14 kWh/alface
	Mezanino	-----		
	Sala de geminação	-----		
Galpão 300 m <sup>2</sup> - Condicionador de ar a 30 °C	Sala de produção	-----	478.443,49 kWh/ano	4,21 kWh/alface
	Mezanino	-----		
	Sala de geminação	-----		
Galpão 500 m <sup>2</sup> - Condicionador de ar a 30 °C	Sala de produção	-----	746.578,74 kWh/ano	3,86 kWh/alface
	Mezanino	-----		
	Sala de geminação	-----		
Galpão 100 m <sup>2</sup> - Condicionador de ar a 24 °C	Sala de produção	-----	191.802,07 kWh/ano	5,55 kWh/alface
	Mezanino	-----		
	Sala de geminação	-----		
Galpão 300 m <sup>2</sup> - Condicionador de ar a 24 °C	Sala de produção	-----	503.781,75 kWh/ano	4,43 kWh/alface
	Mezanino	-----		
	Sala de geminação	-----		
Galpão 500 m <sup>2</sup> - Condicionador de ar a 24 °C	Sala de produção	-----	788.443,96 kWh/ano	4,07 kWh/alface
	Mezanino	-----		
	Sala de geminação	-----		

Fonte: Autor (2019).

### 4.3 ESTUDO DE AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Com os resultados encontrados através das simulações, buscou-se por possíveis soluções de eficiência energética para adaptar o galpão à atividade da Fazenda Vertical. Como já destacado, o alto consumo de energia elétrica ocorreu devido ao elevado uso da iluminação artificial. Logo, fez-se necessário introduzir no projeto possíveis soluções para diminuir o uso das luminárias (Figura 26).

**Figura 26** - Fluxograma do estudo de ações de eficiência energética.



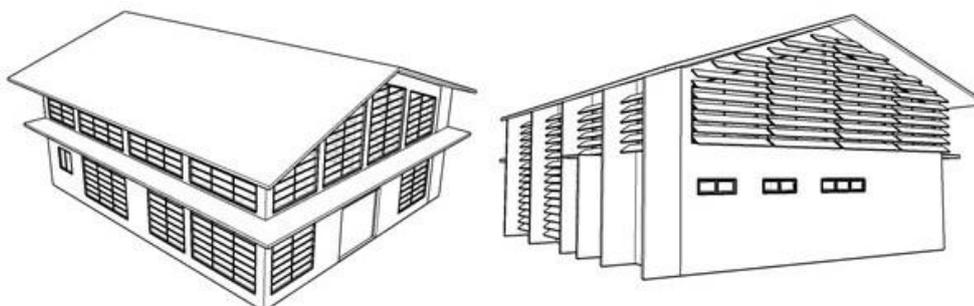
Fonte: autor (2019).

A partir desse enfoque, foram criados outros três Cenários utilizando como modelo de comparação o galpão com área produtiva de 100 m<sup>2</sup>, sob ventilação natural, chamado linha de

base. Esses Cenários serviram como base de análise das ações de eficiência energética para o edifício adaptado à atividade da agricultura vertical e estão descritos a seguir:

- Cenário 1: manteve-se o galpão, mas para diminuir a quantidade de luminárias houve a troca do PPFD, de  $290 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  para  $200 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , e do fotoperíodo, de 6/2 para 18/6 (claro/escuro);
- Cenário 2: conforme ilustra a Figura 27, além da troca do PPFD e do fotoperíodo, foram criadas novas janelas e houve o aumento dos vãos das já existentes. Além disso, em todas as fachadas foram inseridos *brises* na cor branca (Figuras 29 e 30);

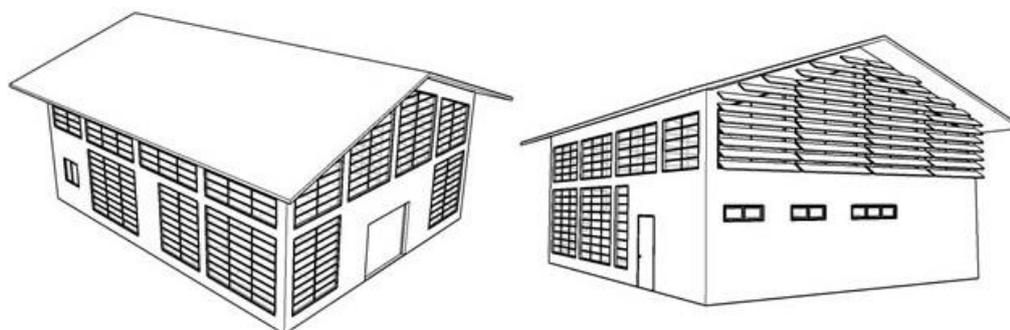
**Figura 27** - Perspectiva do galpão de  $100 \text{ m}^2$  no Cenário 2.



Fonte: autor (2019).

- Cenário 3: como mostra a Figura 28, além da troca do PPFD, do fotoperíodo, da criação de novas janelas e do aumento do vão das existentes, foram inseridos *brises* em palhetas horizontais na cor branca na fachada Oeste (Figuras 31 e 32).

**Figura 28** - Perspectiva do galpão de  $100 \text{ m}^2$  no Cenário 3.



Fonte: autor (2019).

Primeiramente, verificou-se que o fotoperíodo 6/2 (claro/escuro) pode não ser o ideal para locais com clima quente. Dessa forma, utilizando a pesquisa de Kang et al. (2013), substituiu-se pelo fotoperíodo 18/6 (claro/escuro). Assim, as alfaces podem receber iluminação

entre 04:00 horas e 22:00 horas, repousando durante parte da noite. Soma-se que, com a finalidade de diminuir o número de luminárias necessárias ao funcionamento da atividade, alterou-se o PPFD para  $200 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  (Figura 7).

Com relação ao estudo sobre possíveis soluções de eficiência energética relacionadas à arquitetura edilícia, nas salas produtivas, foi estabelecida a abertura de novas janelas e o aumento dos vãos das já existentes. Essas aberturas foram criadas para, possivelmente, proporcionar mais iluminação natural dentro desses ambientes.

**Figura 29** – Estudo de insolação nas fachadas do Cenário 2, no Solstício de Verão (21/12).



Fonte: autor (2019).

Assim, para todos os tamanhos de galpão, a proporção dos vãos das janelas das salas de produção e geminação ficou da seguinte forma:

- Sala de geminação: 160% da área do piso;

- Sala de produção: 37% da área do piso na fachada Norte, 30% da área do piso na fachada Sul, 49% da área superficial da parede na fachada Leste e 31,8 % da área superficial da parede na fachada Oeste.

**Figura 30** – Estudo de insolação no Cenário 2, no Solstício de Inverno (21/06).



Fonte: autor (2019).

Posteriormente, dentro do *software Sketchup*, fez-se um estudo adotando o uso de *brises* na cor branca em todas as fachadas (Cenário 2) e um outro com o uso de *brises* horizontais em palhetas na cor branca apenas na fachada Oeste (Cenário 3).

Para o Cenário 2, um *brise* horizontal contínuo com extensão de 1 (um) metro, com mesma extensão do beiral, foi posicionado à altura de 3,10 m do piso, nas fachadas Leste e Sul. Na fachada Norte, os *brises* verticais (instalados junto aos pilares do galpão) e o *brise* horizontal contínuo foram dimensionados, também, com 1 (um) metro. Ainda na fachada Norte, foram inseridos *brises* horizontais em palhetas fixas para proteção das janelas. Na fachada Oeste, optou-se apenas pela instalação de *brises* horizontais em palhetas fixas nas janelas (Figuras 29 e 30). Com relação ao Cenário 3, apenas foram instalados *brises* horizontais em palhetas fixas

nas janelas da fachada Oeste, nas demais fachadas se optou por não instalar *brises* (Figuras 31 e 32).

**Figura 31** - Estudo de insolação no Cenário 3, no Solstício de Verão (21/12).



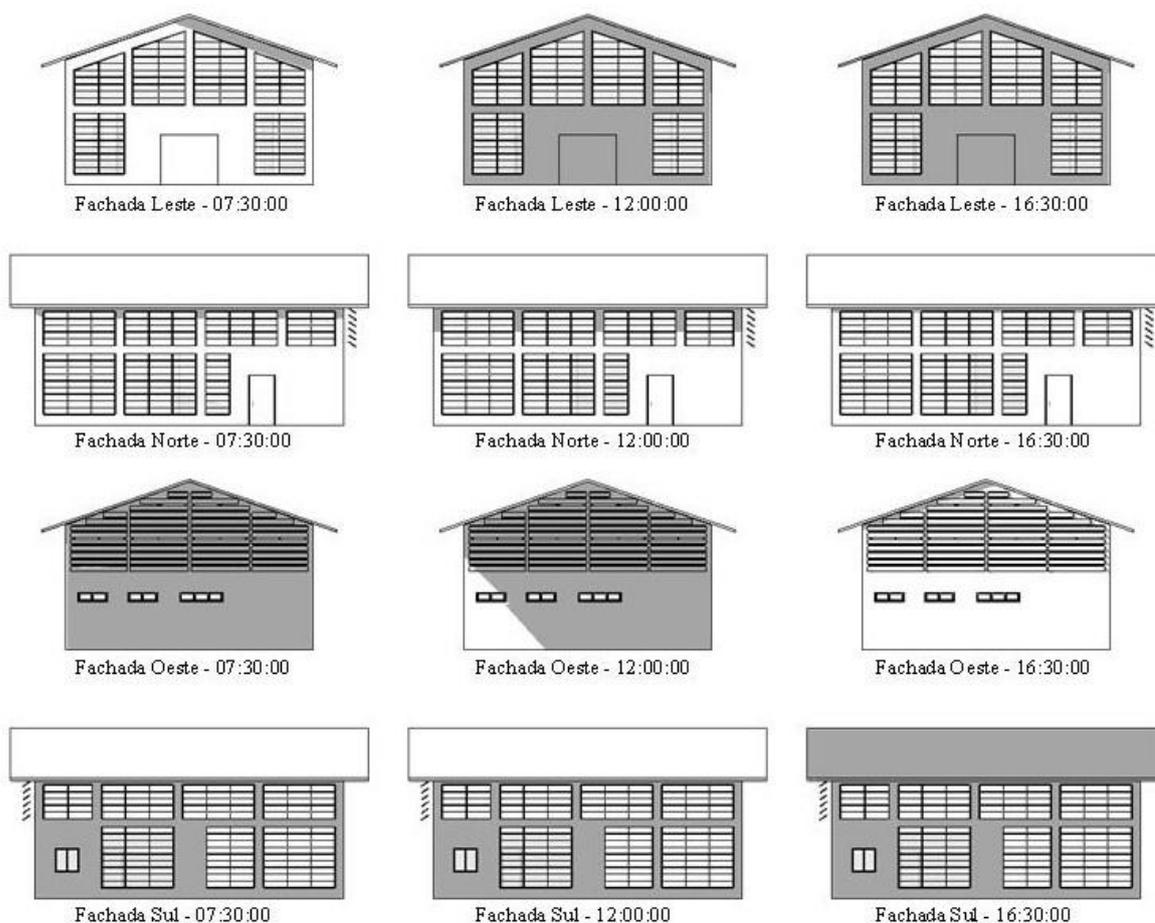
Fonte: autor (2019).

Como já mencionado, os *brises* horizontais em palhetas (fachadas Norte e Oeste) foram estimados e posicionados de acordo com o estudo de insolação nas fachadas. Assim, esses *brises* foram configurados no *DesignBuilder* da seguinte forma:

- Espessura das palhetas: 3 cm;
- Espaçamento vertical entre palhetas: 28 cm;
- Ângulo de inclinação das palhetas: 35°;
- Distância da janela: 30 cm;
- Comprimento das palhetas: 35 cm;
- Distância da verga: - 5 cm (número negativo);
- Transpasse horizontal das janelas: 10 cm (cada lado).

Os três Cenários incluídos na pesquisa foram comparados, junto aos resultados encontrados na primeira simulação (Item 4.2). Contudo, como foram propostas alterações nos valores de PPFd (de  $290 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  para  $200 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) e fotoperíodo (de 6/2 para 18/6), foi necessário quantificar as luminárias novamente.

**Figura 32** - Estudo de insolação no Cenário 3, no Solstício de Inverno (21/06).



Fonte: autor (2019).

#### 4.3.1 Configuração das luminárias dos novos Cenários

Para os novos Cenários, manteve-se a luminária de LED *Philips Green Power*, com saída regular, descrita em 3.4.4 (Figura 21). Contudo, houve alterações nas configurações das luminárias dos ambientes produtivos (sala de produção, sala de geminação e mezanino), junto a seus fotoperíodos, que foram realizadas nos menus “*Activity*” e “*Lighting*” do *DesignBuilder*.

No menu “*Activity*”, em “*Lighting*”, ainda com base na pesquisa de Kang et al. (2013), o “*Target Illuminance*” (iluminação entregue) foi configurado em 2.254 lux, que é o valor da conversão do PPFd de  $200 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  para a unidade de medida de nível de iluminância, em lux (WAVEFORM LIGHTING, [s.d.]).

No menu “*Lighting*”, em “*General Lighting*”, houveram duas alterações de valores para cada Cenário, uma em “*Normalised power density*” e outra em “*Schedule*”. Este se refere a alteração no fotoperíodo (de 6/2 para 18/6 – claro/escuro), já o primeiro está intimamente ligado à quantidade de luminárias do ambiente.

Logo, para encontrar o valor de “*Normalised power density*”, foi necessário quantificar as luminárias necessárias a cada ambiente produtivo, separadamente.

#### 4.3.1.1 Sala de produção

Na sala de produção, o número de luminárias foi estabelecido através das Equações (1), (2), (3) e (4). Primeiramente, foi necessário calcular a área total da fileira padrão, através da Equação (1).

$$A_{tf} = 1,20 \times M_{lf} \quad (1)$$

$$A_{tf} = 1,20 \times 8,4$$

$$A_{tf} = 10,08 \text{ m}^2$$

Com a área da fileira padrão foi possível encontrar o valor do fluxo luminoso, recorrendo à Equação (2).

$$F_l = 2.254 \times 10,08 \quad (2)$$

$$F_l = 22.720,32 \text{ lm}$$

Na conversão, para lâmpada de LED com cores vermelha e azul e faixa espectral entre 450 nm e 650 nm, 22.720,32 lumens equivalem a um PPF de 2.015,99  $\mu\text{mol/s}$  (WAVEFORM LIGHTING, [s.d.]). Assim, deu-se continuidade na Equação (3).

$$N_l = PPF_f / PPF_{lum} \quad (3)$$

$$N_l = 2.015,99 / 520$$

$$N_l = 3,87$$

$$N_l = 4 \text{ luminárias}$$

Por último, calculou-se a quantidade de luminárias necessárias para entregar 2.254 lux em todo o ambiente, através da Equação (4).

$$N_{tl} = N_l \times N_p \times N_{fp} \quad (4)$$

$$N_{tl} = 4 \times 6 \times 4,28$$

$$N_{tl} = 102,72$$

$$N_{tl} = 103 \text{ luminárias}$$

Logo, o número total de luminárias que é necessário para entregar um nível de iluminância de 2.254 lux para toda a sala de produção dos novos Cenários é de 103 (cento e três) luminárias.

#### 4.3.1.2 Sala de geminação

Como na sala de produção, foi necessário encontrar o número total de luminárias para a sala de geminação dos novos Cenários. Logo, foi necessário calcular a área total da fileira, através da Equação (1).

$$A_{tf} = 1,20 \times M_{lf} \quad (1)$$

$$A_{tf} = 1,20 \times 4$$

$$A_{tf} = 4,8 \text{ m}^2$$

Com a área total da fileira, foi possível encontrar o valor do fluxo luminoso, através da Equação (2).

$$F_l = 2.254 \times 4,8 \quad (2)$$

$$F_l = 10.819,2 \text{ lm}$$

Na conversão, para lâmpada de LED, com cores vermelha e azul e faixa espectral entre 450 nm e 650 nm, 10.819,2 lumens equivalem a um PPF de 960  $\mu\text{mol/s}$  (WAVEFORM LIGHTING, [s.d.]). Assim, deu-se continuidade na Equação (3).

$$N_l = PPF_f / PPF_{lum} \quad (3)$$

$$N_l = 960 / 520$$

$$N_l = 1,84$$

$$N_l = 2 \text{ luminárias}$$

Por último, calculou-se a quantidade de luminárias necessárias para entregar 2.254 lux em todo o ambiente, através da Equação (4).

$$N_{tl} = N_l \times N_p \times N_{fp} \quad (4)$$

$$N_{tl} = 2 \times 5 \times 1$$

$$N_{tl} = 10 \text{ luminárias}$$

Logo, o número total de luminárias que é necessário para entregar um nível de iluminância de 2.254 lux para toda a sala de geminação dos novos Cenários é de 10 (dez) luminárias.

#### 4.3.1.3 Cálculo do valor de “Normalised power density”

Convém mostrar o cálculo do “Normalised power density”, para cada ambiente produtivo, de forma separada, através da Equação (6).

- Sala de produção: como a sala de produção possui pé direito duplo, a quantidade de luminárias do ambiente (103 luminárias) foi dividida por 2 (dois) e a parte mais alta foi renomeada como mezanino - os valores de configuração de “Lighting” no mezanino foram copiados da sala de produção - assim, as luminárias foram simuladas em todo o pé direito duplo do galpão.

$$NPD = \frac{\left(\frac{P_l \times N_{tl}}{A_a}\right)}{\left(\frac{N_i}{100}\right)} = \frac{\left(\frac{175 \times 52}{91,63}\right)}{\left(\frac{2.254}{100}\right)} = \frac{99,31}{22,54} = 4,4059 \frac{W}{m^2} - 100 \text{ lux}$$

- Sala de geminação:

$$NPD = \frac{\left(\frac{P_l \times N_{tl}}{A_a}\right)}{\left(\frac{N_i}{100}\right)} = \frac{\left(\frac{175 \times 10}{7,49}\right)}{\left(\frac{2.254}{100}\right)} = \frac{233,64}{22,54} = 10,3655 \frac{W}{m^2} - 100 \text{ lux}$$

Logo, os valores de “Normalised power density” para a sala de produção/mezanino e a sala de geminação nos novos Cenários são de, respectivamente, 4,4059 W/m<sup>2</sup>-100 lux e 10,3655 W/m<sup>2</sup>-100 lux.

Para melhor compreensão, sentiu-se a necessidade de criar a Tabela 5, contendo o resumo das informações de iluminação nos novos Cenários, inseridas durante a simulação no *DesignBuilder* (Tabela 5).

**Tabela 5** - Resumo das informações alteradas nos novos Cenários propostos perante a linha de base.

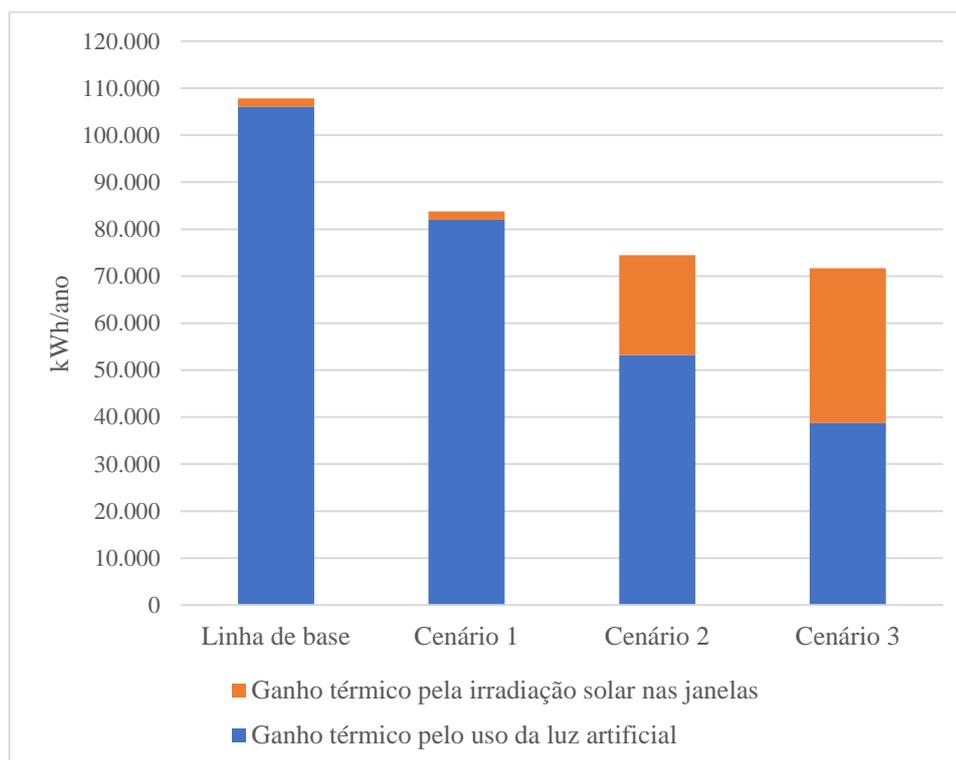
Cenário	Fachadas com <i>brises</i>	Tipos de <i>brises</i>	Ambiente	Número de luminárias	Nível de iluminância	Fotoperíodo	<i>Normalised power density</i>
Cenário 1	-----	-----	Sala de produção	52	2.254 lux	18/6	4,4059 W/m <sup>2</sup> - 100 lux
			Mezanino	52			
			Sala de geminação	10			
Cenário 2	Norte, Sul, Leste e Oeste	Verticais e horizontais	Sala de produção	52	2.254 lux	18/6	4,4059 W/m <sup>2</sup> - 100 lux
			Mezanino	52			
			Sala de geminação	10			
Cenário 3	Oeste	Horizontais	Sala de produção	52	2.254 lux	18/6	4,4059 W/m <sup>2</sup> - 100 lux
			Mezanino	52			
			Sala de geminação	10			
Linha de base	-----	-----	Sala de produção	78	3.268 lux	6/2	4,56 W/m <sup>2</sup> - 100 lux
			Mezanino	78			4,56 W/m <sup>2</sup> - 100 lux
			Sala de geminação	15			10,72 W/m <sup>2</sup> - 100 lux

Fonte: Autor (2019).

### 4.3.2 Resultados da análise dos novos Cenários

Empregadas, as simulações dos Cenários 1, 2 e 3 tiveram como resultados as estimativas de ganho térmico do edifício, de conforto ambiental das salas produtivas e de consumo energético. Esses dados de saída foram comparados com os resultados encontrados na primeira simulação (Item 4.2).

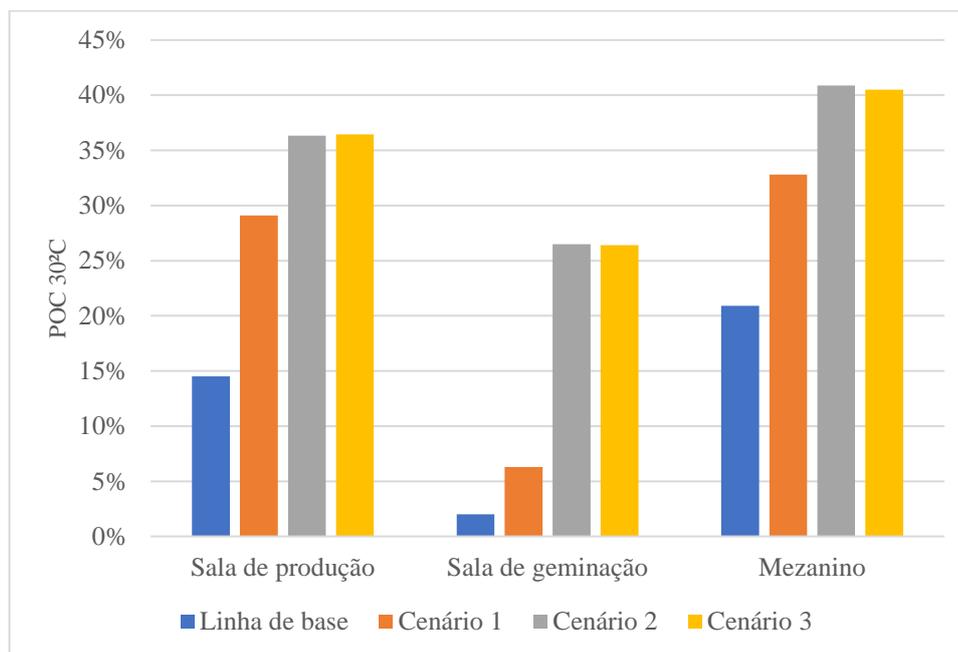
**Gráfico 6** - Ganho térmico nos novos Cenários propostos para o galpão de 100 m<sup>2</sup> (kWh/ano).



Fonte: Autor (2019).

Através do Gráfico 6, é possível observar que o ganho térmico pelo uso da luz artificial foi decrescente na medida em que houve a troca do fotoperíodo (de 6/2 para 18/6 – claro/escuro) e o aumento na abertura das janelas. Em contrapartida, fica nítido que o aumento das janelas é proporcional ao aumento do ganho térmico pela irradiação solar. Assim, pela comparação realizada nesse gráfico, o Cenário 3 foi o que melhor correspondeu ao comparativo de ganho térmico. Mesmo com *brises* apenas na fachada Oeste, esse Cenário obteve melhor equilíbrio entre o ganho térmico pela irradiação solar nas janelas e pelo uso da luz artificial.

Com relação ao conforto ambiental nas salas produtivas, sob ventilação natural (sala de produção, mezanino e sala de geminação), adotando o POC de 30 °C, pode-se observar que as alterações propostas nos Cenários 1, 2 e 3 têm o potencial de contribuir para o arrefecimento natural do ambiente (Gráfico 7).

**Gráfico 7** - Percentual anual de horas Ocupadas em Conforto a até 30 °C (POC 30 °C).

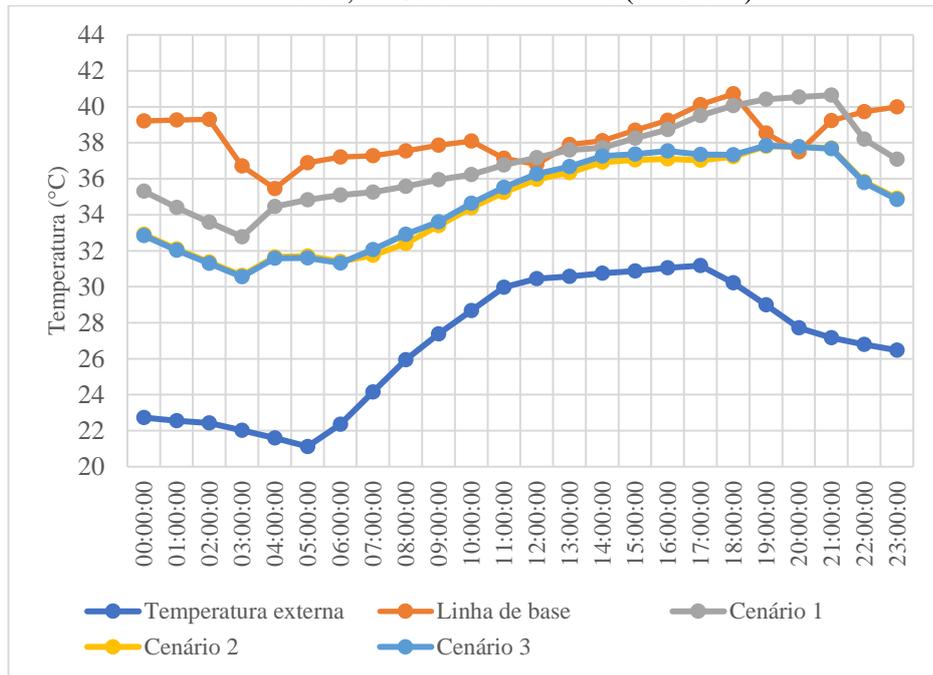
Fonte: Autor (2019).

Verifica-se no Gráfico 7 que os Cenários 2 e 3 se adaptaram melhor quando comparados ao Cenário 1 e à linha de base. Tal fato aconteceu devido à criação/aumento dos vãos das janelas. Além de permitirem maior entrada de iluminação natural, as amplas janelas podem facilitar a troca de ar entre os ambientes produtivos e a área externa.

O fotoperíodo 18/6 (claro/escuro) e a troca do PPFD permitiram que os Cenários simulados passem a ter mais horas em conforto, quando adotado o POC de 30 °C. Os resultados podem ser verificados nos Gráficos 8, 9 e 10, que trazem o comportamento térmico das salas produtivas durante o Solstício de Verão (dia 21 de dezembro).

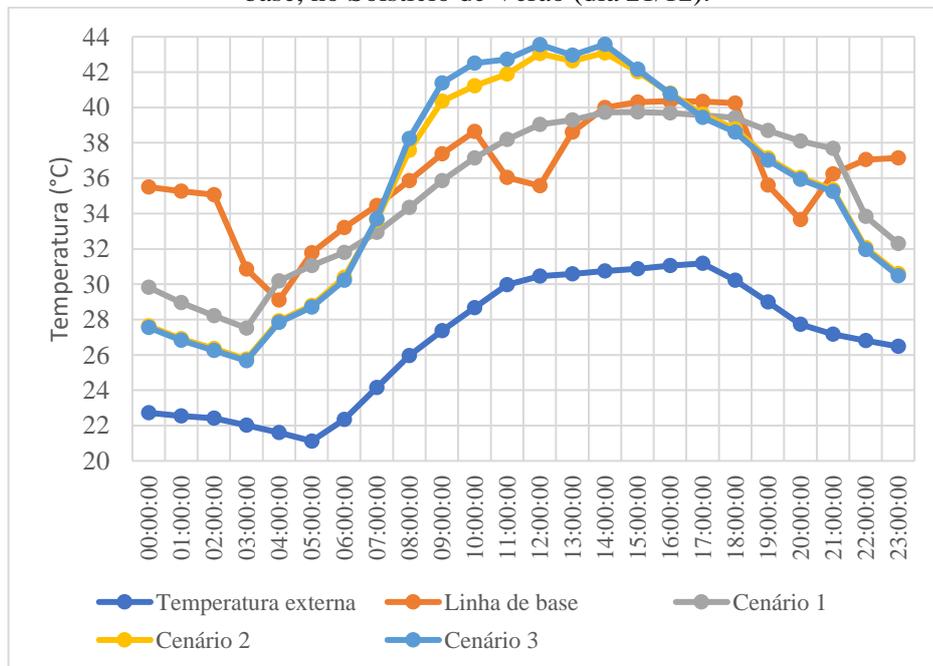
Conforme observado, ao longo do dia, as temperaturas nas salas produtivas dos Cenários 1, 2 e 3 continuam mais altas em relação ao ambiente externo. Pode-se verificar também que o aumento da temperatura interna ocorre com maior intensidade durante o funcionamento das luminárias, entre 04:00 horas e 22:00 horas, de acordo com o que foi estabelecido para o fotoperíodo 18/6. Isso denota que, mesmo com a abertura dos vãos, a entrada de iluminação natural nos ambientes produtivos ainda não foi suficiente para se manter as temperaturas interna e externa equilibradas.

**Gráfico 8** - Temperatura ambiental na sala de geminação dos novos Cenários propostos perante a linha de base, no Solstício de Verão (dia 21/12).



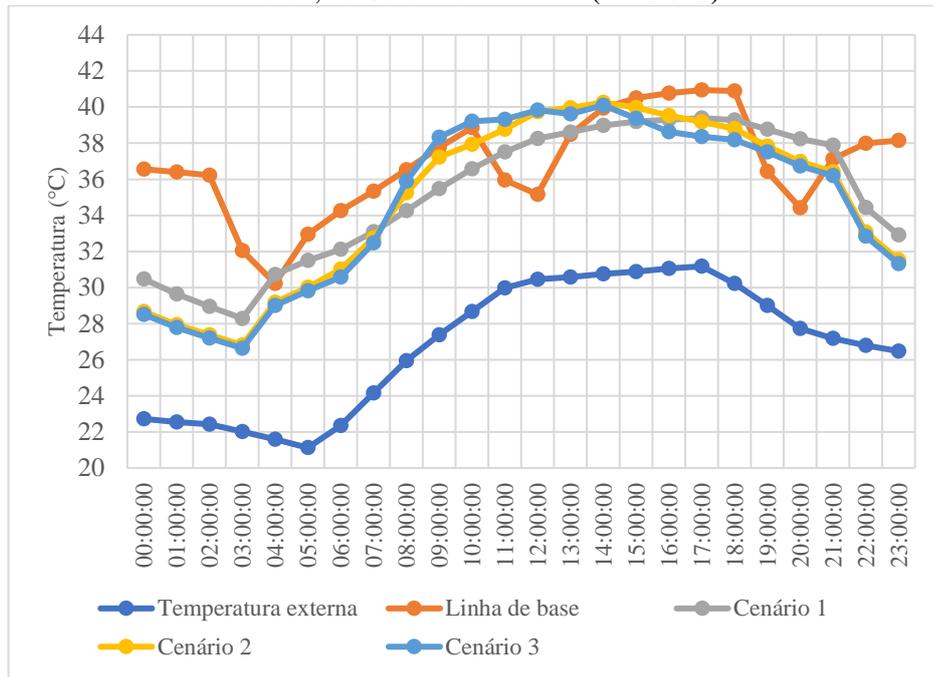
Fonte: Autor (2019).

**Gráfico 9** - Temperatura ambiental no mezanino dos novos Cenários propostos perante a linha de base, no Solstício de Verão (dia 21/12).



Fonte: Autor (2019).

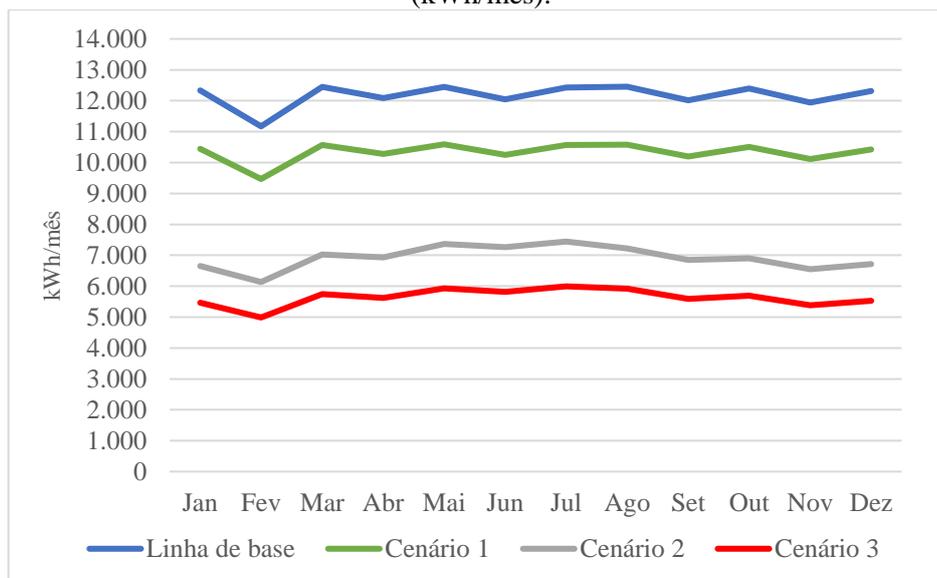
**Gráfico 10** - Temperatura ambiental na sala de produção dos novos Cenários propostos perante a linha de base, no Solstício de Verão (dia 21/12).



Fonte: Autor (2019).

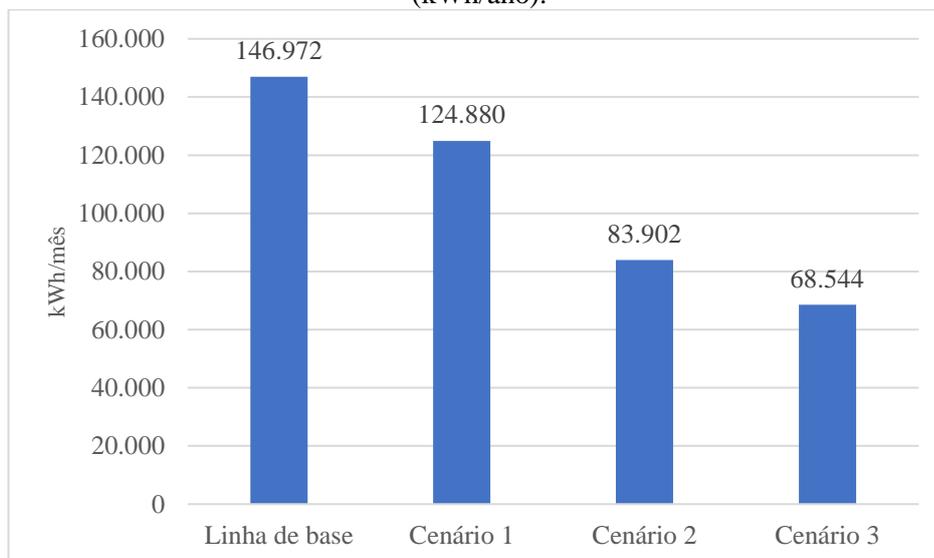
Por último, a partir dos Gráficos 11 e 12 foi possível confirmar um melhor comportamento nos Cenários 2 e 3, perante o consumo energético do edifício com 100 m<sup>2</sup> de área produtiva sob ventilação natural (linha de base).

**Gráfico 11** - Consumo mensal de energia elétrica dos novos Cenários perante a linha de base (kWh/mês).



Fonte: Autor (2019).

**Gráfico 12** - Consumo anual de energia elétrica dos novos Cenários perante a linha de base (kWh/ano).



Fonte: Autor (2019).

Nessa comparação, o Cenário 3 foi o que melhor se adaptou à atividade da agricultura vertical para o modelo de galpão estudado. Assim, esse Cenário foi simulado adotando os galpões com área produtiva de 300 m<sup>2</sup> e 500 m<sup>2</sup>. A simulação também foi realizada em ambiente controlado (uso de condicionador de ar), a temperatura de 30 °C e 24 °C, para todos os tamanhos de galpão.

#### 4.4 SIMULAÇÕES COM O CENÁRIO 3

Com a adoção do Cenário 3, com PPFD de 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  e fotoperíodo 18/6 (claro/escuro), houve a necessidade de quantificar as luminárias para os galpões com área produtiva de 300 m<sup>2</sup> e 500 m<sup>2</sup>. Assim, optou-se por quantificar essas luminárias e definir os valores de “*Normalised power density*”, em “*General Lighting*” (menu “*Lighting*”), separadamente.

##### 4.4.1 Galpão com 300 m<sup>2</sup> de área produtiva (Cenário 3)

Aqui, os ambientes produtivos foram descritos em forma sequencial.

###### 4.4.1.1 Sala de produção

Na sala de produção do galpão com 300 m<sup>2</sup> de área produtiva (Cenário 3), o número de luminárias foi estabelecido através das Equações (1), (2), (3) e (4). Primeiramente, foi necessário calcular a área total da fileira padrão, através da Equação (1).

$$A_{tf} = 1,20 \times M_{lf} \quad (1)$$

$$A_{tf} = 1,20 \times 26$$

$$A_{tf} = 31,2 \text{ m}^2$$

Com a área da fileira padrão foi possível encontrar o valor do fluxo luminoso, utilizando a Equação (2).

$$F_l = 2.254 \times 31,2 \quad (2)$$

$$F_l = 70.324,8 \text{ lm}$$

Na conversão, para lâmpada de LED com cores vermelha e azul e faixa espectral entre 450 nm e 650 nm, 70.324,8 lumens equivalem a um PPF de 6.239,98  $\mu\text{mol/s}$  (WAVEFORM LIGHTING, [s.d.]). Assim, deu-se continuidade na Equação (3).

$$N_l = PPF_f / PPF_{lum} \quad (3)$$

$$N_l = 6.239,98 / 520$$

$$N_l = 11,99$$

$$N_l = 12 \text{ luminárias}$$

Por último, calculou-se a quantidade de luminárias necessárias para entregar 2.254 lux em todo o ambiente, através da Equação (4).

$$N_{tl} = N_l \times N_p \times N_{fp} \quad (4)$$

$$N_{tl} = 12 \times 6 \times 4,55$$

$$N_{tl} = 327,6$$

$$N_{tl} = 328 \text{ luminárias}$$

Logo, o número total de luminárias que é necessário para entregar um nível de iluminância de 2.254 lux para toda a sala de produção do galpão com 300 m<sup>2</sup> de área produtiva, no Cenário 3, é de 328 (trezentos e vinte e oito) luminárias.

#### 4.4.1.2 Sala de geminação

Na sala de geminação, o mesmo *layout* das bandejas/prateleiras foi mantido em todos os tamanhos de galpão (fileira única ao longo do ambiente com espessura de 1,20 m). Essa opção permitiu que o cálculo do número total de luminárias fosse mais simplificado, multiplicando o número total de luminárias estimadas para o galpão de 100 m<sup>2</sup> pela divisão entre a área do galpão de 300 m<sup>2</sup> ou 500 m<sup>2</sup> e a área do galpão de 100 m<sup>2</sup>, seguindo o que dispõe a Equação (5).

$$N_{tl} = N_{100m^2} \times \left(\frac{A_{tg}}{100}\right) \quad (5)$$

$$N_{tl} = 10 \times \left(\frac{300}{100}\right)$$

$$N_{tl} = 30 \text{ luminárias}$$

Logo, o número total de luminárias que é necessário para entregar um nível de iluminância de 2.254 lux para toda a sala de geminação do galpão com 300 m<sup>2</sup> de área produtiva (Cenário 3) é de 30 (trinta) luminárias.

#### 4.4.1.3 Valor de “Normalised power density” para o galpão de 300 m<sup>2</sup> (Cenário 3)

Optou-se por mostrar o cálculo do “Normalised power density” nos ambientes produtivos, para cada ambiente (sala de produção, mezanino e sala de geminação), através da Equação (6).

- Sala de produção: como a sala de produção possui pé direito duplo, a quantidade de luminárias do ambiente (328 luminárias) foi dividida por 2 (dois) e a parte mais alta foi renomeada como mezanino - os valores de configuração de “Lighting” no mezanino foram copiados da sala de produção - assim, as luminárias foram simuladas em todo o pé direito duplo do galpão.

$$NPD = \frac{\left(\frac{P_l \times N_{tl}}{A_a}\right)}{\left(\frac{N_l}{100}\right)} = \frac{\left(\frac{175 \times 164}{275,48}\right)}{\left(\frac{2.254}{100}\right)} = \frac{104,18}{22,54} = 4,622 \frac{W}{m^2} - 100 \text{ lux}$$

- Sala de geminação:

$$NPD = \frac{\left(\frac{P_l \times N_{tl}}{A_a}\right)}{\left(\frac{N_l}{100}\right)} = \frac{\left(\frac{175 \times 30}{22,47}\right)}{\left(\frac{2.254}{100}\right)} = \frac{233,64}{22,54} = 10,3655 \frac{W}{m^2} - 100 \text{ lux}$$

Logo, os valores de “*Normalised power density*” para a sala de produção/mezanino e a sala de geminação no Cenário 3 são de, respectivamente, 4,622 W/m<sup>2</sup>-100 lux e 10,3655 W/m<sup>2</sup>-100 lux.

#### 4.4.2 Galpão com 500 m<sup>2</sup> de área produtiva (Cenário 3)

Novamente, os ambientes produtivos foram descritos em forma sequencial.

##### 4.4.2.1 Sala de produção

Na sala de produção do galpão com 500 m<sup>2</sup> de área produtiva (Cenário 3), o número de luminárias foi estabelecido através das Equações (1), (2), (3) e (4). De início, foi necessário calcular a área total da fileira padrão, através da Equação (1).

$$A_{tf} = 1,20 \times M_{lf} \quad (1)$$

$$A_{tf} = 1,20 \times 44,4$$

$$A_{tf} = 53,28 \text{ m}^2$$

Com a área da fileira padrão foi possível encontrar o valor do fluxo luminoso, adotando a Equação (2).

$$F_l = 2.254 \times 53,28 \quad (2)$$

$$F_l = 120.093,12 \text{ lm}$$

Na conversão, para lâmpada de LED com cores vermelha e azul e faixa espectral entre 450 nm e 650 nm, 120.093,12 lumens equivalem a um PPF de 10.655,97 μmol/s (WAVEFORM LIGHTING, [s.d.]). Assim, deu-se continuidade na Equação (3).

$$N_l = PPF_f / PPF_{lum} \quad (3)$$

$$N_l = 10.655,97 / 520$$

$$N_l = 20,49$$

$$N_l = 21 \text{ luminárias}$$

Por último, calculou-se a quantidade de luminárias necessárias para entregar 2.254 lux em todo o ambiente, através da Equação (4).

$$N_{tl} = N_l \times N_p \times N_{fp} \quad (4)$$

$$N_{tl} = 21 \times 6 \times 4,45$$

$$N_{tl} = 560,7$$

$$N_{tl} = 561 \text{ luminárias}$$

Logo, o número total de luminárias que é necessário para entregar um nível de iluminância de 2.254 lux para toda a sala de produção do galpão com área produtiva de 500 m<sup>2</sup>, Cenário 3, é de 561 (quinhentos e sessenta e uma) luminárias.

#### 4.4.2.2 Sala de geminação

O mesmo *layout* das bandejas/prateleiras foi mantido na sala de geminação, em todos os tamanhos de galpão (fileira única ao longo do ambiente com espessura de 1,20 m). Assim, o cálculo do número total de luminárias foi mais simplificado, multiplicando o número total de luminárias estimadas para o galpão de 100 m<sup>2</sup> pela divisão entre a área do galpão de 300 m<sup>2</sup> ou 500 m<sup>2</sup> e a área do galpão de 100 m<sup>2</sup>, na forma que dispõe a Equação (5).

$$N_{tl} = N_{l100m^2} \times \left(\frac{A_{tg}}{100}\right) \quad (5)$$

$$N_{tl} = 10 \times \left(\frac{500}{100}\right)$$

$$N_{tl} = 50 \text{ luminárias}$$

Logo, o número total de luminárias que é necessário para entregar um nível de iluminância de 2.254 lux para toda a sala de geminação do galpão com 500 m<sup>2</sup> de área produtiva (Cenário 3) foi de 50 (cinquenta) luminárias.

#### 4.4.2.3 Valor de “Normalised power density” para o galpão de 500 m<sup>2</sup> (Cenário 3)

Para melhor entendimento, sentiu-se a necessidade de mostrar o cálculo do “*Normalised power density*” nos ambientes produtivos, para cada ambiente (sala de produção, mezanino e sala de geminação), através da Equação (6).

- Sala de produção: como a sala de produção possui pé direito duplo, a quantidade de luminárias do ambiente (561 luminárias) foi dividida por 2 (dois) – adotado 562 luminárias para a divisão - e a parte mais alta foi renomeada como mezanino - os valores de configuração de “*Lighting*” no mezanino foram copiados da sala de produção - assim, as luminárias foram simuladas em todo o pé direito duplo do galpão.

$$NPD = \frac{\left(\frac{P_l \times N_{tl}}{A_a}\right)}{\left(\frac{N_i}{100}\right)} = \frac{\left(\frac{175 \times 281}{459,34}\right)}{\left(\frac{2.254}{100}\right)} = \frac{107,05}{22,54} = 4,7493 \frac{W}{m^2} - 100 \text{ lux}$$

- Sala de geminação:

$$NPD = \frac{\left(\frac{P_l \times N_{tl}}{A_a}\right)}{\left(\frac{N_i}{100}\right)} = \frac{\left(\frac{175 \times 50}{37,45}\right)}{\left(\frac{2.254}{100}\right)} = \frac{233,64}{22,54} = 10,3655 \frac{W}{m^2} - 100 \text{ lux}$$

Assim, os valores de “*Normalised power density*” para a sala de produção/mezanino e a sala de geminação (galpão com 500 m<sup>2</sup> de área produtiva), no Cenário 3, são de, respectivamente, 4,7493 W/m<sup>2</sup>-100 lux e 10,3655 W/m<sup>2</sup>-100 lux.

Para melhor compreensão das informações de iluminação inseridas no *DesignBuilder*, verificou-se oportuno a criação da Tabela 6, contendo o resumo das informações sobre a iluminação.

#### 4.4.3 Resultados das simulações com o Cenário 3

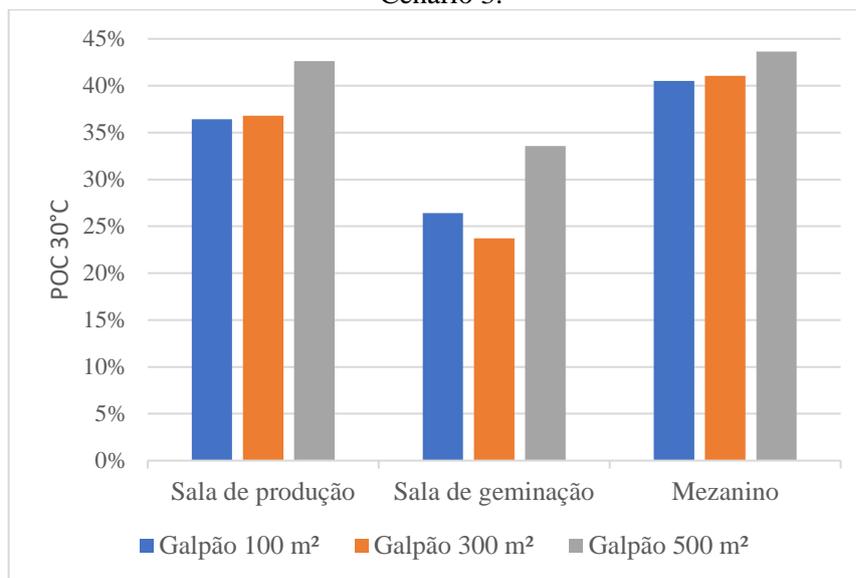
Primeiramente, obteve-se como resultado da simulação dos galpões (Cenário 3) o Percentual anual de horas Ocupadas em Conforto (POC) dos ambientes com produção (sala de produção, mezanino e sala de geminação), sob ventilação natural, adotando a temperatura máxima de 30 °C (Gráfico 13).

**Tabela 6** - Resumo das informações de iluminação dos modelos de galpão (Cenário 3).

Modelo	Ambiente	Template	Número de luminárias	Normalised power density	Schedule	Altura do plano de trabalho (m)
Galpão 100 m <sup>2</sup>	Sala de produção	<i>LED with linear control</i>	52	4,4059 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 18/6	0,8
	Mezanino	<i>LED with linear control</i>	52	4,4059 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 18/6	0,8
	Sala de geminação	<i>LED with linear control</i>	10	10,3655 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 18/6	0,6
	Sala de administração	<i>LED</i>	-----	-----	24 horas	-----
	Depósito	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----
	Circulação	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----
	Banheiros	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----
Galpão 300 m <sup>2</sup>	Sala de produção	<i>LED with linear control</i>	164	4,622 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 18/6	0,8
	Mezanino	<i>LED with linear control</i>	164	4,622 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 18/6	0,8
	Sala de geminação	<i>LED with linear control</i>	30	10,3655 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 18/6	0,6
	Sala de administração	<i>LED</i>	-----	-----	24 horas	-----
	Depósito	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----
	Circulação	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----
	Banheiros	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----
Galpão 500 m <sup>2</sup>	Sala de produção	<i>LED with linear control</i>	281	4,7493 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 18/6	0,8
	Mezanino	<i>LED with linear control</i>	281	4,7493 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 18/6	0,8
	Sala de geminação	<i>LED with linear control</i>	50	10,3655 W/m <sup>2</sup> - 100 lux	Fotoperíodo 18/6	0,6
	Sala de administração	<i>LED</i>	-----	-----	24 horas	-----
	Depósito	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----
	Circulação	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----
	Banheiros	<i>LED</i>	-----	-----	-----	-----

Fonte: Autor (2019).

**Gráfico 13** - Percentual de horas Ocupadas em Conforto a até 30 °C (POC 30 °C) para os galpões no Cenário 3.



Fonte: Autor (2019).

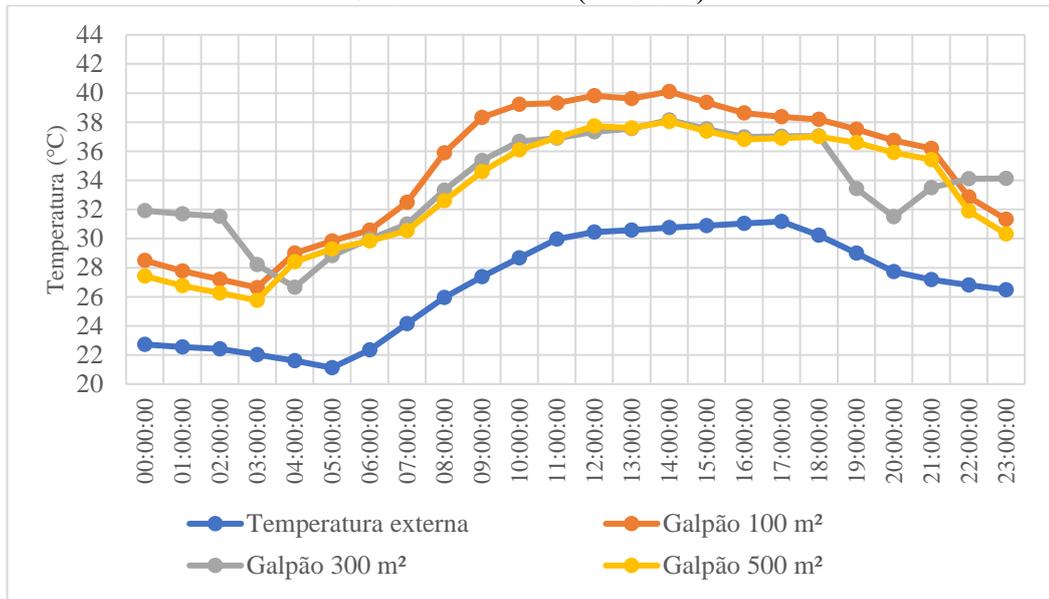
No Gráfico 13 é possível observar que, quando em ventilação natural, o galpão com área produtiva de 500 m<sup>2</sup> foi o que apresentou o melhor resultado em relação ao POC de 30 °C. Para o Cenário 3, o mezanino ainda foi o ambiente que teve mais horas com temperatura até 30 °C, chegando a 43,63% do total de horas.

A sala de geminação continuou sendo o ambiente com o menor desempenho para arrefecimento sob ventilação natural. Porém, no Cenário 3, o POC de 30 °C chegou a atingir 33,55% do total de horas em atividade no ambiente para o galpão com 500 m<sup>2</sup> de área produtiva, o que demonstrou uma melhora significativa quando comparado à simulação inicial, no qual o POC de 30 °C, sob a mesma área de galpão, chegou ao máximo de 1,35%.

Com relação à sala de produção, também houve melhoras significativas. O POC de 30 °C chegou a atingir 42,63% do total de horas, no galpão com 500 m<sup>2</sup> de área produtiva. Para os galpões com 300 m<sup>2</sup> e 100 m<sup>2</sup> de área produtiva, os POCs de 30 °C foram de 36,82% e 36,44%, respectivamente.

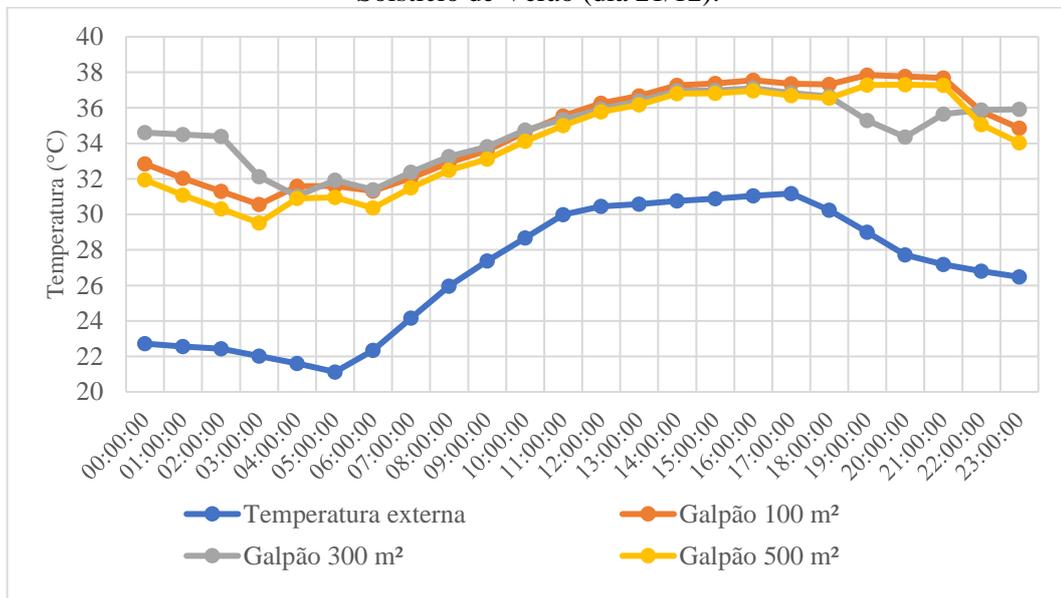
Analisando os Gráficos 14, 15 e 16, pode-se observar que, no Solstício de Verão, mesmo no Cenário 3, os ambientes produtivos dos galpões permanecem, constantemente, com temperatura interna mais alta que a temperatura externa. Porém, ao longo do dia, é perceptível o fato de que os galpões com área produtiva de 300 m<sup>2</sup> e 500 m<sup>2</sup> obtiveram temperaturas mais baixas do que o galpão com área produtiva de 100 m<sup>2</sup>. Esses gráficos ainda indicam o aumento no ganho térmico pelo uso das luminárias, uma vez que a elevação da temperatura está ligada ao fotoperíodo de 18/6 (funcionamento das 04:00 horas às 22:00 horas).

**Gráfico 14** - Temperatura ambiental na sala de produção dos galpões simulados no Cenário 3, no Solstício de Verão (dia 21/12).



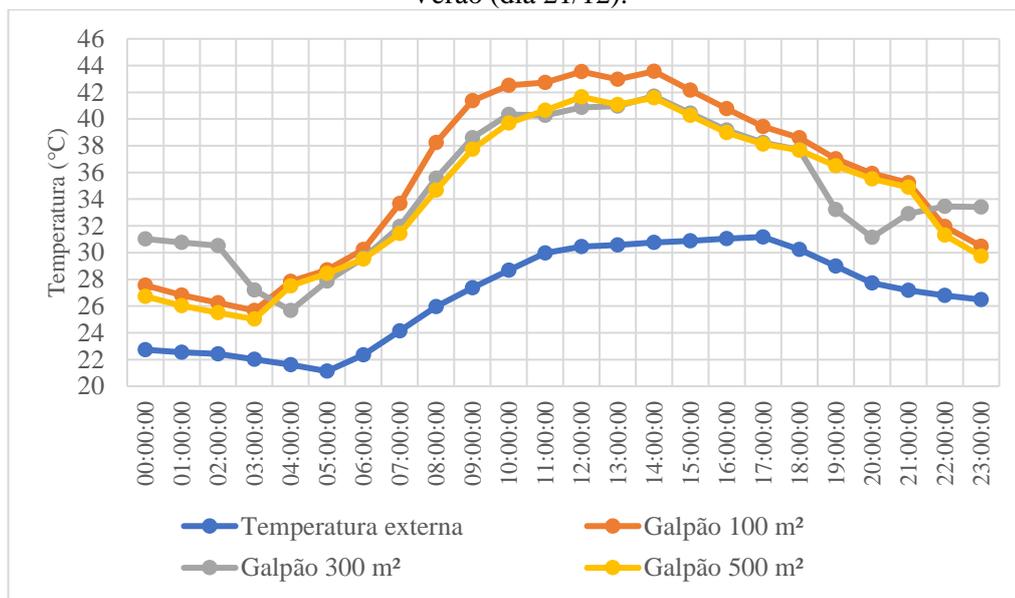
Fonte: Autor (2019).

**Gráfico 15** - Temperatura ambiental na sala de geminação dos galpões simulados no Cenário 3, no Solstício de Verão (dia 21/12).



Fonte: Autor (2019).

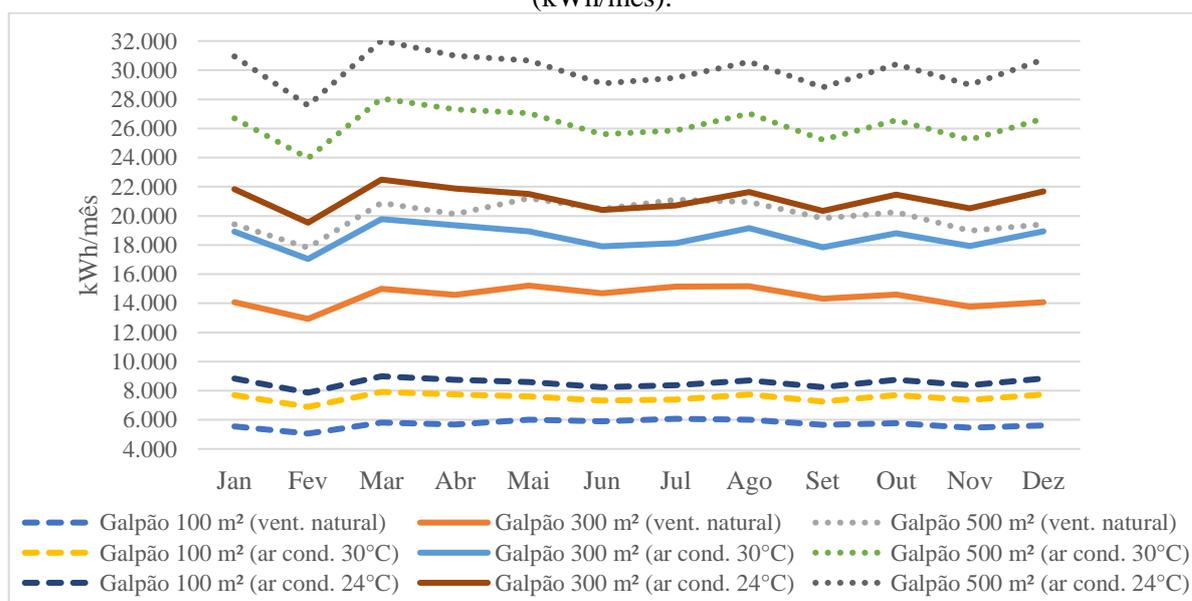
**Gráfico 16** - Temperatura ambiental no mezanino dos galpões simulados no Cenário 3, no Solstício de Verão (dia 21/12).



Fonte: Autor (2019).

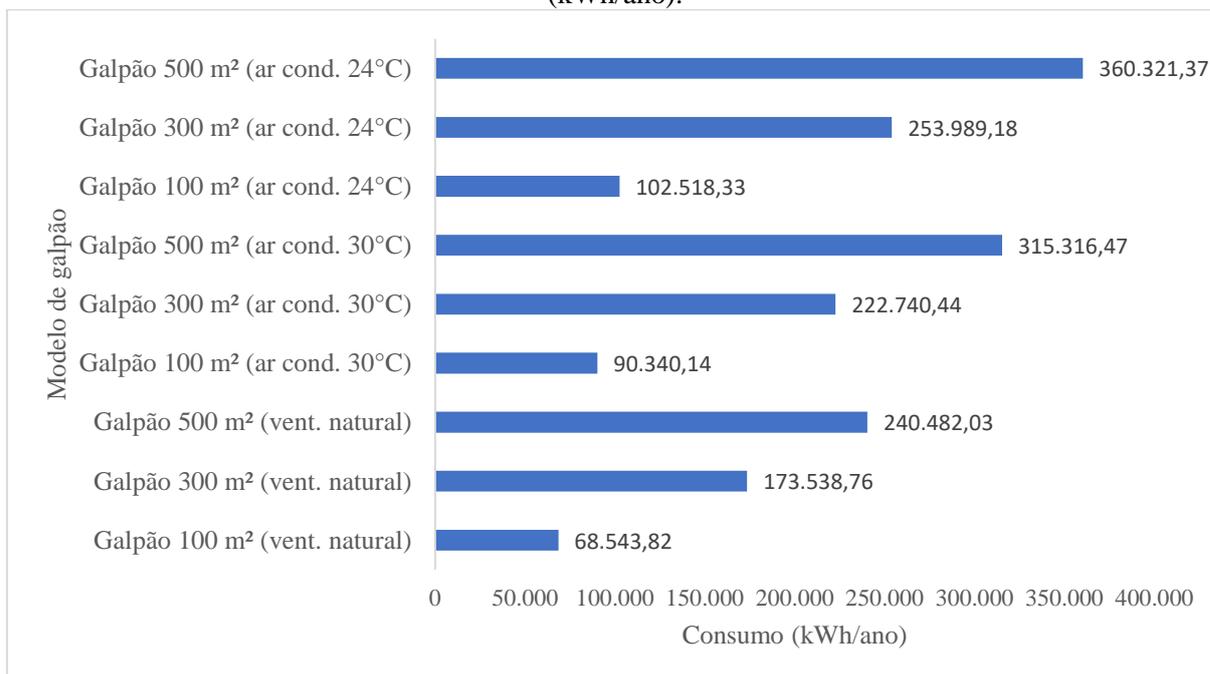
Com relação ao consumo energético, é possível observar que houve uma redução significativa no consumo de energia elétrica dos galpões simulados no Cenário 3, quando comparados aos galpões simulados no Item 4.2. Salienta-se que o consumo energético ocasionado pelo conjunto moto-bomba, de 884,58 kWh/ano, também foi incluso no consumo total dos modelos simulados no Cenário 3 (Gráficos 17 e 18).

**Gráfico 17** - Consumo mensal de energia elétrica para cada modelo de galpão simulado no Cenário 3 (kWh/mês).



Fonte: Autor (2019).

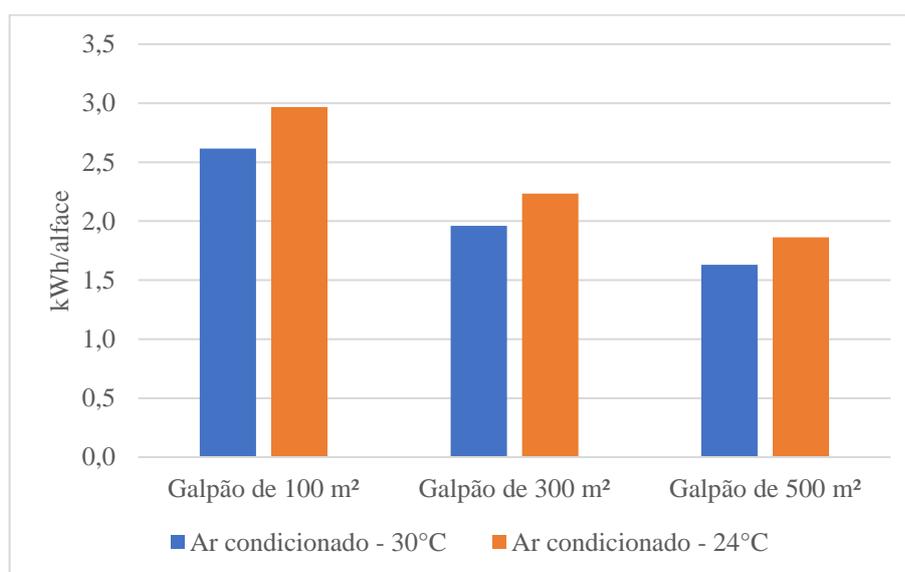
**Gráfico 18** - Consumo anual de energia elétrica para cada modelo de galpão simulado no Cenário 3 (kWh/ano).



Fonte: Autor (2019).

Assim, com base no potencial de produção de cada tamanho de galpão (descrito no Item 4.2), foi possível quantificar o consumo de energia elétrica necessário ao desenvolvimento de cada unidade de alface, nos modelos de galpão do Cenário 3, onde o cultivo seja possível - uso de condicionador de ar a 24 °C e a 30 °C (Gráfico 19).

**Gráfico 19** - Consumo de energia elétrica por alface produzido no Cenário 3 (kWh/alface).



Fonte: Autor (2019).

Em termos de kWh por unidade de alface produzida (kWh/alface), o galpão com 500 m<sup>2</sup> de área produtiva continuou sendo mais vantajoso, pois o consumo energético por alface foi menor (1,63 kWh/alface para condicionador de ar a 30 °C e 1,86 kWh/alface para condicionador de ar a 24 °C). Esse resultado contribui para a indicação de que, quando comparado ao galpão com 500 m<sup>2</sup> de área produtiva da linha de base, o galpão de 500 m<sup>2</sup> do Cenário 3 proporcionou redução em mais de 50% no consumo de energia elétrica por unidade de alface produzida (Tabela 7).

**Tabela 7** - Resumo dos resultados da simulação com o Cenário 3.

Modelo	Ambiente	POC 30 °C	Consumo total do edifício	Consumo por alface
Galpão 100 m <sup>2</sup> - Ventilação natural	Sala de produção	36,44%	68.543,82 kWh/ano	-----
	Mezanino	40,50%		
	Sala de geminação	26,42%		
Galpão 300 m <sup>2</sup> - Ventilação natural	Sala de produção	36,82%	173.538,76 kWh/ano	-----
	Mezanino	41,05%		
	Sala de geminação	23,73%		
Galpão 500 m <sup>2</sup> - Ventilação natural	Sala de produção	42,63%	240.482,03 kWh/ano	-----
	Mezanino	43,63%		
	Sala de geminação	33,55%		
Galpão 100 m <sup>2</sup> - Condicionador de ar a 30 °C	Sala de produção	-----	90.340,138 kWh/ano	2,61 kWh/alface
	Mezanino	-----		
	Sala de geminação	-----		
Galpão 300 m <sup>2</sup> - Condicionador de ar a 30 °C	Sala de produção	-----	222.740,44 kWh/ano	1,96 kWh/alface
	Mezanino	-----		
	Sala de geminação	-----		
Galpão 500 m <sup>2</sup> - Condicionador de ar a 30 °C	Sala de produção	-----	315.316,47 kWh/ano	1,63 kWh/alface
	Mezanino	-----		
	Sala de geminação	-----		
Galpão 100 m <sup>2</sup> - Condicionador de ar a 24 °C	Sala de produção	-----	102.518,32 kWh/ano	2,97 kWh/alface
	Mezanino	-----		
	Sala de geminação	-----		
Galpão 300 m <sup>2</sup> - Condicionador de ar a 24 °C	Sala de produção	-----	253.989,18 kWh/ano	2,23 kWh/alface
	Mezanino	-----		
	Sala de geminação	-----		
Galpão 500 m <sup>2</sup> - Condicionador de ar a 24 °C	Sala de produção	-----	360.321,37 kWh/ano	1,86 kWh/alface
	Mezanino	-----		
	Sala de geminação	-----		

Fonte: autor (2019)

#### 4.5 PAINÉIS FOTOVOLTAÍCOS

Para o dimensionamento dos painéis fotovoltaicos se adotou as dimensões da face do telhado voltada ao Norte, para cada tamanho de galpão. Assim, foi possível dimensionar o modelo escolhido de placa fotovoltaica - que está descrito no Item 3.7 - para cada um dos modelos de galpão supracitados, seguindo a Equação (7). Para a altura da placa, a medida original foi mantida (1,96 m). Já para a dimensão da base do painel, adotou-se a medida de 1 m.

- Galpão de 100 m<sup>2</sup>:

$$N_{tp-100m^2} = \left(\frac{6,47}{A_p}\right) x \left(\frac{C_c}{B_p}\right) \quad (7)$$

$$N_{tp-100m^2} = \left(\frac{6,47}{1,96}\right) x \left(\frac{14,84}{1}\right)$$

$$N_{tp-100m^2} = 3 x 14$$

$$N_{tp-100m^2} = 42 \text{ painéis}$$

- Galpão de 300 m<sup>2</sup>:

$$N_{tp-300m^2} = \left(\frac{6,47}{A_p}\right) x \left(\frac{C_c}{B_p}\right) \quad (7)$$

$$N_{tp-300m^2} = \left(\frac{6,47}{1,96}\right) x \left(\frac{34,84}{1}\right)$$

$$N_{tp-300m^2} = 3 x 34$$

$$N_{tp-300m^2} = 102 \text{ painéis}$$

- Galpão de 500 m<sup>2</sup>:

$$N_{tp-500m^2} = \left(\frac{6,47}{A_p}\right) x \left(\frac{C_c}{B_p}\right) \quad (7)$$

$$N_{tp-500m^2} = \left(\frac{6,47}{1,96}\right) x \left(\frac{54,84}{1}\right)$$

$$N_{tp-500m^2} = 3 x 54$$

$$N_{tp-500m^2} = 162 \text{ painéis}$$

Assim, o potencial máximo de geração de energia elétrica, para cada modelo de galpão, foi estimado com base no potencial de geração anual de cada painel, seguindo o que dispõe a Equação (8).

- Galpão de 100 m<sup>2</sup>:

$$P_{ef-100m^2} = N_{tp} \times (P_p \times 365) \quad (8)$$

$$P_{ef-100m^2} = 42 \times (1,113 \times 365)$$

$$P_{ef-100m^2} = 42 \times 406,24$$

$$P_{ef-100m^2} = 17.062,08 \text{ kWh/ano}$$

- Galpão de 300 m<sup>2</sup>:

$$P_{ef-300m^2} = N_{tp} \times (P_p \times 365) \quad (8)$$

$$P_{ef-300m^2} = 102 \times (1,113 \times 365)$$

$$P_{ef-300m^2} = 102 \times 406,24$$

$$P_{ef-300m^2} = 41.436,48 \text{ kWh/ano}$$

- Galpão de 500 m<sup>2</sup>:

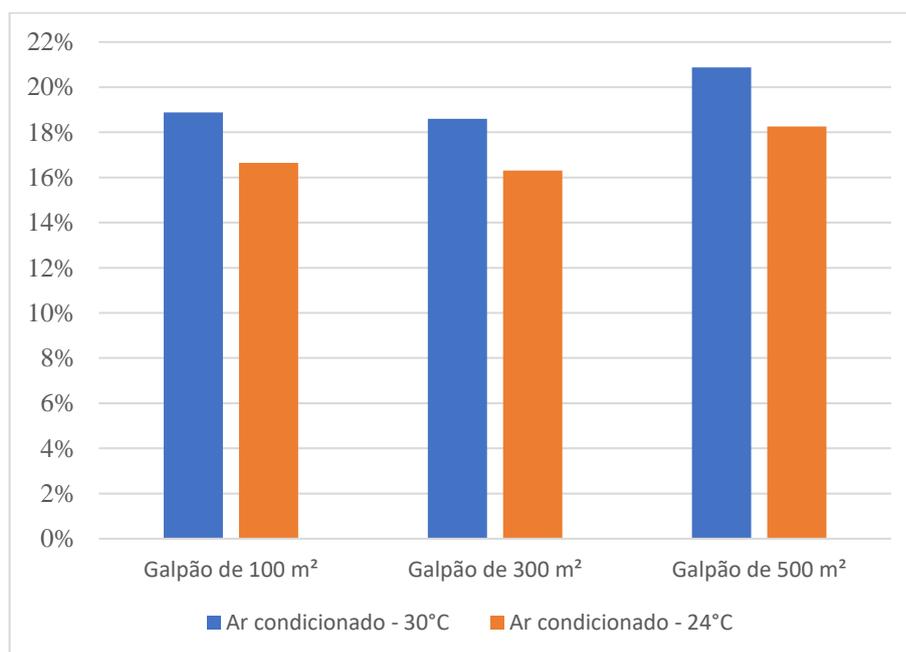
$$P_{ef-500m^2} = N_{tp} \times (P_p \times 365) \quad (8)$$

$$P_{ef-500m^2} = 162 \times (1,113 \times 365)$$

$$P_{ef-500m^2} = 162 \times 406,24$$

$$P_{ef-500m^2} = 65.810,88 \text{ kWh/ano}$$

Com o potencial de geração anual de energia fotovoltaica, para cada tamanho de galpão, foi possível estimar o percentual de consumo que se pode abater da energia adquirida da concessionária local para os modelos simulados no Cenário 3, com o uso de condicionador de ar, que permitem o cultivo de alface hidropônico em face do conforto térmico (Gráfico 20).

**Gráfico 20** - Percentual de abatimento da energia fotovoltaica perante a concessionária de energia.

Fonte: Autor (2019).

Com o Gráfico 20, e diante da organização dos módulos dispostos na (Figura 13 e 22), pode-se considerar que o uso dos painéis fotovoltaicos tem o potencial de diminuir em até 20,87% o uso da rede elétrica de energia (galpão de 500 m<sup>2</sup>, no Cenário 3). O consumo energético, ocasionado pelo uso da iluminação artificial, ainda é muito elevado. Apesar do painel fotovoltaico escolhido possuir um índice de eficiência considerado alto na conversão - de 17% - o consumo energético dos modelos de galpão simulados não permitiu uma melhor redução no uso da rede de energia.



## 5 DISCUSSÃO

Os resultados apresentados no Item 4.2 indicam que os galpões simulados sob as características da linha de base não possuem uma arquitetura eficiente, tanto no que diz respeito às vedações verticais quanto às aberturas. Quando comparados aos resultados obtidos com a pesquisa de Al-Chalabi (2015), este conclui que a viabilidade técnica e econômica do uso de painéis solares fotovoltaicos em Fazendas Verticais, para o bioclima do Reino Unido, está ligada à área do piso e suas dimensões.

Para o bioclima de Campo Grande/MS, porém, os resultados apresentados no Cenário 3 mostram que, além da área e dimensões do piso, a arquitetura do envelope construtivo e as ações de eficiência energética são determinantes para essa viabilização. Ao longo desta pesquisa, verificou-se que para países com clima quente é necessário prever soluções para o arrefecimento natural dos ambientes destinados ao cultivo, além de maximizar o potencial de iluminação natural, buscando diminuir o uso da luz artificial.

Essas informações condizem com o trabalho de Benis et al. (2017) que, avaliando os diversos modelos de agricultura, em Lisboa – citados em 2.4 – concluíram que, quanto mais fechado for o ambiente, menor será a entrada de luz natural e maior será o consumo energético pelas luminárias. Ainda mais, como constatado no Item 4.2, tratando-se de um clima quente como o de Campo Grande/MS, o excessivo uso das luminárias de LED também causa o aumento de calor no ambiente, superdimensionando o uso da climatização artificial.

Na comparação com a pesquisa de Benis et al. (2017), pode-se observar que o consumo de energia elétrica por quilograma de tomate produzido (kWh/kg), no modelo onde esses pesquisadores obtiveram os piores resultados (*Farm 4* – ambiente totalmente enclausurado, Figura 4), foi menor que o consumo de energia por unidade de alface (kWh/alface) na simulação do galpão onde foi aferido o melhor resultado no Cenário da Linha de Base (galpão com 500 m<sup>2</sup> de área produtiva). Porém, quando adotado o Cenário com maiores vãos e menor uso de iluminação artificial (Cenário 3), percebeu-se a ocorrência de um aumento significativo no POC 30 °C. Tais simulações mostram que Fazendas Verticais, implantadas em locais com clima quente, estão mais propícias a um elevado consumo de energia elétrica quando ações de eficiência energética não são levadas em consideração, pois existe a necessidade potencial do arrefecimento dos ambientes.

Por mais que Kang et al. (2013) afirmem que o fotoperíodo mais adequado ao desenvolvimento da alface seja o fotoperíodo 6/2 (claro/escuro), mostrou-se que para a

eficiência energética este não é o ideal. A combinação entre o fotoperíodo empregado no desenvolvimento do cultivo e o aproveitamento da iluminação natural pode levar a bons resultados. Isso posto, de acordo com os resultados apresentados nos Cenários 1, 2 e 3, o fotoperíodo 18/6 (claro/escuro) pode melhor se adaptar a essa combinação. Assim, os cultivos podem tirar proveito da luz natural durante todo o dia, tendo a iluminação artificial apenas função suplementar. Durante a noite, por 6 (seis) horas, as luminárias ficariam desligadas, diminuindo, assim, o consumo energético e o lançamento de calor no ambiente.

Outra decisão que tem potencial para trazer melhores resultados, em relação ao consumo energético, é a escolha do nível de iluminância. Cada tipo de cultivo necessita de uma faixa de nível de iluminância para o seu desenvolvimento. Com a possibilidade de se adotar um PPFD com valor menor, pode ocorrer a redução do número de luminárias e, como consequência, a quantidade de carga térmica lançada nos ambientes produtivos e o consumo de energia podem ser minimizados.

Analisando a pesquisa realizada por Bayley et al. (2011), estes constataram que, para o clima europeu, o consumo de energia elétrica por unidade de planta em cultivo vertical (seis metros de altura) chegou a atingir o mínimo de 0,25 kWh/planta. Quando comparado aos resultados obtidos com a simulação no galpão de 500 m<sup>2</sup> de área produtiva, no Cenário 3, verificou-se que existe uma diferença significativa, pois o consumo mínimo nas condições possíveis para o cultivo de alface hidropônica foi de 1,63 kWh/alface.

Com a adoção da energia elétrica fotovoltaica (Item 4.5), observou-se que o consumo perante a concessionária de energia elétrica possui um fator de redução considerável. Adotando o potencial de geração fotovoltaica estudado, o consumo perante a concessionária de energia elétrica local pode ser diminuído em até 20,87%. Tal estratégia pode significar uma redução no consumo energético de 0,47 kWh/alface, totalizando o custo de 1,16 kWh/alface.

## 6 CONCLUSÃO

O trabalho atingiu o objetivo geral que era avaliar o uso da energia solar fotovoltaica na operação de Fazendas Verticais, em galpões convencionais, para o contexto bioclimático urbano de Campo Grande/MS.

Para tal, projetou-se galpões de Fazenda Vertical, com três diferentes áreas produtivas, de 100 m<sup>2</sup>, 300 m<sup>2</sup> e 500 m<sup>2</sup>, no *Sketchup*. Simulou-se e quantificou-se os seus consumos energéticos no *DesignBuilder*, para a produção de alface hidropônico, no contexto bioclimático ao qual pertence o município de Campo Grande/MS. Com os resultados dos consumos energéticos, dimensionou-se a capacidade de geração de energia elétrica, através de painéis fotovoltaicos, instalados na cobertura dos galpões projetados. Também foi estimado o percentual de redução do consumo total de energia elétrica que o sistema de energia fotovoltaica *on grid*, instalado na cobertura dos galpões, poderia propiciar para o funcionamento da Fazenda Vertical.

Nas simulações, foram feitas avaliações de diferentes Cenários, adotando ações de eficiência energética com o intuito de verificar o melhor resultado. Os cenários foram estabelecidos em função da abertura dos vãos, da diminuição do uso da iluminação artificial e da proteção da radiação solar direta.

O melhor Cenário foi onde ocorreu diminuição de iluminação artificial - pela minimização da intensidade luminosa das lâmpadas de LED e ajuste do fotoperíodo em que essas ficavam acesas - e onde haviam maiores aberturas, com posicionamento da proteção solar na fachada Oeste, através de *brise*. Nesse Cenário, adotando o uso de condicionador de ar à 30 °C, para o galpão de 100 m<sup>2</sup>, o consumo anual foi de 90.340,14 kWh, que representou uma diminuição de 51% em relação ao Cenário inicial. Com essa área de telhado foi possível dimensionar painéis solares, que representam 18,89% do consumo.

Ao considerar o galpão com 300 m<sup>2</sup>, também sob o uso de condicionador de ar à 30 °C, o consumo anual foi de 222.740,44 kWh, que representou uma diminuição de 46% em relação ao Cenário inicial. Com essa área de telhado foi possível dimensionar painéis solares, que representam 18,6% do consumo.

Em relação ao galpão com 500 m<sup>2</sup>, o consumo anual foi de 315.316,47 kWh, sob o uso de condicionador de ar à 30 °C, que representou uma diminuição de 42% em relação ao Cenário inicial. Com essa área de telhado foi possível dimensionar painéis solares, que representam 20,87% do consumo.

Por mais que o tema da Fazenda Vertical tenha obtido atenção dos pesquisadores nos últimos anos e o uso de energias renováveis estar sendo bastante pesquisado nesse meio, os poucos trabalhos encontrados na Revisão Sistemática são insuficientes para afirmar, de maneira geral, que ações de eficiência energética podem tornar economicamente viável a atividade agrícola verticalizada dentro de edifícios.

Com relação às simulações realizadas, pode-se considerar que o elevado uso da luz artificial levou à impossibilidade de se tornar lucrativo o cultivo de alface hidropônico nas condições e modelos de galpão utilizados. Devido ao fato de que, além do consumo energético pela própria iluminação artificial, o consumo ocasionado pelo uso de condicionador de ar foi muito alto.

Verificou-se que ao se utilizar as luminárias, mesmo levando em consideração sua eficiência, ocorreu também o aumento da carga térmica no ambiente. Ficando tal fato nítido ao perceber que a temperatura interna das salas produtivas estava mais alta que a temperatura externa ao galpão. Outro resultado apontado, que confirma essa afirmação, é o fato da temperatura nesses ambientes ter perda de calor nos momentos de descanso dos fotoperíodos trabalhados (6/2 e 18/6 – claro/escuro). Nesses momentos, por estarem desligadas, as luminárias deixariam de inserir calor nos ambientes produtivos. Assim, para a iluminação artificial, aferiu-se que o fotoperíodo 6/2 não é o ideal em países com clima quente, uma vez que é necessário o arrefecimento dos ambientes.

Outra observação, obtida ao longo das simulações, que pode auxiliar no arrefecimento dos ambientes produtivos, são os climatizadores evaporativos. Esses equipamentos permitem que o tempo de funcionamento do condicionador de ar seja amenizado, além de propiciar o controle de umidade para o cultivo.

É importante frisar que, em se tratando de alface (cultivo amplamente difundido na forma convencional de plantio em Campo Grande/MS), dificilmente se pode viabilizar uma Fazenda Vertical, pois o custo de 1,16 kWh/alface representa um percentual considerável dos gastos, inviabilizando o negócio. Entretanto, possivelmente, quando se adota o cultivo vertical de outras culturas, com maior valor agregado, o mesmo consumo de 1,16 kWh/planta poderá se tornar viável, técnica e economicamente.

Ao final dessa pesquisa, entende-se oportuno salientar a importância de se realizar estudos sobre: simulações com o uso de climatizadores evaporativos; simulações com culturas vegetais que possuam necessidades bioclimáticas que, devido às características locais, só poderiam ser cultivadas em ambientes controlados; e simulações de novos arranjos fotovoltaicos, com *layouts* diferentes dos apresentados.



## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASSIAN, A. **World food prices reach new historic peak**. Disponível em: <<http://www.fao.org/news/story/en/item/50519/icode/>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

ABNT. **NBR 15575 - Norma de desempenho**, 2013.

ABNT. **NBR 9050 - Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.

ABNT. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações - zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**, 2003.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 482**. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 687**. 2015. 25 f.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Cadernos Temáticos ANEEL: Micro e Minigeração Distribuída** Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161>>. Acesso em: 29 jun. 2018

AL-CHALABI, M. Vertical farming: Skyscraper sustainability? **Sustainable Cities and Society**, v. 18, p. 74–77, 2015.

ALEKSANDROV, Y. New solution: Cultivation and storage of soft fruits and vegetables in volumes, situated on rotating rings, and irrigated by a system that uses condensed mist moisture (in super skyscraper, London). **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, v. 24, n. 4, p. 710–718, 2018.

ALENCAR, B. S. DE. **Determinação e análise do custo unitário básico da construção civil para residências unifamiliares do município de Delmiro Gouveia** - ALDelmiro Gouveia, 2019. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/5297>>

ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. **World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision**. Disponível em: <<http://large.stanford.edu/courses/2014/ph240/yuan2/docs/ap106e.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. **World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision**.

BAILEY, G. E. **Vertical Farming**. 1ª ed. [s.l.] Del. E. I. duPont de Nemours powder co Wilmington, 1915.

BANERJEE, C. Up , Up and Away! The Economics of Vertical Farming. **Journal of**

**Agricultural Studies**, v. 2, n. 1, p. 40–60, 2014.

BAYLEY, J. E.; YU, M.; WAY, P. Sustainable Food Production Using High Density Vertical Growing. p. 95–104, 2011.

BENIS, K.; REINHART, C.; FERRÃO, P. Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of Building-Integrated Agriculture (BIA) in urban contexts. **Journal of Cleaner Production**, v. 147, p. 589–602, 2017.

BESTHORN, F. H. Vertical Farming: Social Work and Sustainable Urban Agriculture in an Age of Global Food Crises. **Australian Social Work**, v. 66, n. 2, p. 187–203, 2013.

BLISKA, J. A., **Alface (Lactuca Sativa L.): distintos sistemas de produção, conservação e avaliação pós colheita** Dissertação de Mestrado, Campinas, UNICAMP, , 1998.

BOARETTO, L. C. **Viabilidade econômica da produção de alface, em quatro sistemas tecnológicos : campo coberto, túnel baixo, estufa e hidropônico.** [s.l.] UFPR, 2004.

BRASIL. **Lei n. 10.257, de 10 de Julho de 2001, Estatuto da Cidade.** Brasil, 2001.

BRASIL. **Segurança alimentar 2013: Pesquisa nacional por amostra de domicílios.** [s.l: s.n.].

BROYLES, T. D. Defining the architectural Typology of the Urban Farm. n. October, 2008.

BRUNINI, O. et al. Temperaturas básicas para alface, cultivar White Boston, em sistemas de unidades térmicas. **Bragantia**, p. 213–219, 1976.

BRYLD, E. Potentials, problems, and policy implications for urban agriculture in developing countries. **Agriculture and human values**, v. 20, n. 1, p. 79–86, 2003.

BULA, R. J. et al. Light-emitting Diodes as a Radiation Source for Plants. **HortScience**, v. 26, n. 2, p. 203–205, 1 fev. 1991.

BURÉS, S. **A view beyond traditional growing media uses** *Acta Horticulturae*, 2013. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84892740013&doi=10.17660%2FActaHortic.2013.1013.11&partnerID=40&md5=f1a6055644516638d0a64e21ca404925>>

CEMIG. **Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária – Rede de Distribuição Aérea – Edificações individuais Norma de Distribuição – ND-5.2** Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <[http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Clientes/Documents/Normas Técnicas/nd5\\_1\\_000001p.pdf](http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Clientes/Documents/Normas_Técnicas/nd5_1_000001p.pdf)>

CEMIG. **Energia inteligente: guia do melhor consumo**, 2014. Disponível em: <[http://www.cemig.com.br/pt-br/A\\_Cemig\\_e\\_o\\_Futuro/sustentabilidade/nossos\\_programas/Eficiencia\\_Energetica/Documents/GUIA\\_MELHOR\\_CONSUMO\\_CARTILHA.pdf](http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/Eficiencia_Energetica/Documents/GUIA_MELHOR_CONSUMO_CARTILHA.pdf)>

CHANCE, E. et al. The Plant - Vertical Farms, Urban Restructuring and The Rise of Capitalist Urban Agriculture. **Environmental science & technology**, v. 33, n. 2, p. 482–489, 2014.

CHAPLIN-KRAMER, R. et al. Spatial patterns of agricultural expansion determine impacts on biodiversity and carbon storage. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 112, n. 24, p. 7402–7, 16 jun. 2015.

CHO, R. **Vertical Farms: From Vision to Reality**. Disponível em: <<http://blogs.ei.columbia.edu/2011/10/13/vertical-farms-from-vision-to-reality/>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

COSSU, M. et al. Solar radiation distribution inside a greenhouse with south-oriented photovoltaic roofs and effects on crop productivity. **Applied Energy**, v. 133, p. 89–100, 15 nov. 2014.

DAL SASSO, P.; CALIANDRO, L. P. The role of historical agro-industrial buildings in the study of rural territory. **Landscape and Urban Planning**, v. 96, n. 3, p. 146–162, 2010.

DANIEL, P. Contribution of Vertical Farms to Increase the Overall Energy Efficiency of Urban Agglomerations. **Journal of Power and Energy Engineering**, v. 02, n. 04, p. 82–85, 2014.

DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. **Getting Started EnergyPlus**, 2018.

DESIGNBUILDER. **DesignBuilder Help - Welcome to DesignBuilder v6**. Disponível em: <[https://designbuilder.co.uk/helpv6.0/#GetStarted.htm%3FTocPath%3DGet%2520Started%7C\\_\\_\\_0](https://designbuilder.co.uk/helpv6.0/#GetStarted.htm%3FTocPath%3DGet%2520Started%7C___0)>. Acesso em: 13 ago. 2019.

DESPOMMIER, D. The rise of vertical farms. **Scientific American**, v. 301, n. 5, p. 80–87, 2009.

DESPOMMIER, D. **The Vertical Farm: The World Grows Up**. [s.l.] St Martin's Press, 2010.

DESPOMMIER, D. The vertical farm : controlled environment agriculture carried out in tall buildings would create greater food safety and security for large urban populations. **Journal of Consumer Protection and Food Safety**, p. 233–236, 2011.

DESPOMMIER, D. The Rise of Vertical Farms. **Resource**, n. April, p. 21, 2015.

DESPOMMIER, D.; ELLINGSEN, E. The Vertical Farm : The sky-scraper as vehicle for a sustainable urban agriculture. **New York**, n. January 2008, 2008.

DÍAZ-MÉNDEZ, R. et al. Wind pumps for irrigating greenhouse crops: Comparison in different socio-economical frameworks. **Biosystems Engineering**, v. 128, p. 21–28, 1 dez. 2014.

DORNELLES, K. A. **Absortancia solar de superficies opacas: metodos de determinação e base de dados para tintas latex acrilica e PVA**. [s.l.] UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2008.

ELEKTRO. **Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações**. 1 ed. Campinas-SP, 2012. 315 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica DEA 19/14 Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos**. Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia, 2014.

FAISAL MOHAMMED, S. A. et al. Design and development of a photovoltaic power system for tropical greenhouse cooling. **American Journal of Applied Sciences**, v. 4, n. 6, p. 386–389, 2007.

FAO. **Criar Cidades Mais Verdes**. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/015/i1610p/i1610p00.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

FILGUEIRA, F. A. R. **Manual de olericultura: cultura e comercialização de hortaliças**. 1. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1982.

FOLEY, J. A. et al. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, v. 478, n. 7369, p. 337–342, 12 out. 2011.

FURLANI, P. R. .; SILVEIRA, L. C. P.; BOLONHEZI, D. .; FAQUIM, V. **Cultivo hidropônico de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1999.

GIANEZINI, M.; RUVIARO, C. F.; FAGUNDES, M. A proposta da agricultura vertical no âmbito das perspectivas de produção sustentável. v. 37, n. N° 22, 2016.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4ª ed. São Paulo/SP: Atlas, 2002.

GOLDSTEIN, H. The green promise of vertical farms [Blueprints for a Miracle]. **IEEE Spectrum**, v. 55, n. 6, p. 50–55, 2018.

GOTTEMS, L. **Fazenda vertical produz alface quase sem água**. Disponível em: <[https://www.agrolink.com.br/noticias/fazenda-vertical-produz-alface-quase-sem-agua\\_407374.html?utm\\_source=agrolink-clipping](https://www.agrolink.com.br/noticias/fazenda-vertical-produz-alface-quase-sem-agua_407374.html?utm_source=agrolink-clipping)>. Acesso em: 6 set. 2018.

GRAAMANS, L. et al. Plant factories; crop transpiration and energy balance. **Agricultural Systems**, v. 153, p. 138–147, 2017.

GRAAMANS, L. et al. Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. **Agricultural Systems**, v. 160, p. 31–43, 2018.

GREEN, R. E. et al. Farming and the Fate of Wild Nature. **Science**, v. 307, n. 5709, p. 550 LP–555, 28 jan. 2005.

GRUIA, R. Study on energy resources integration and sustainability of the new modular agriculture pattern. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 10, n. 8, p. 1213–1219, 2011.

HANSEN, E.; DONOHOE, M. Health Issues of Migrant and Seasonal Farmworkers. **Journal of Health Care for the Poor and Underserved**, v. 14, n. 2, p. 153–164, 2003.

HARBICK, K.; ALBRIGHT, L. D. Comparison of energy consumption: Greenhouses and plant factories. **Acta Horticulturae**, v. 1134, p. 285–292, 2016.

HASSANIEN, R. et al. Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses.

**Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 989–1001, 2016.

HAYDEN, A. L. **Aeroponic and hydroponic systems for medicinal herb, rhizome, and root crops**. [s.l.] The Society, 2006. v. 41

HE, J. **Integrated vertical aeroponic farming systems for vegetable production in space limited environments** *Acta Horticulturae*, 2017. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85036671316&doi=10.17660%2FActaHortic.2017.1176.5&partnerID=40&md5=03e0bde308a0382051939e2f98504999>>

HE, J.; LEE, S. K. **Impact of climate change on food security and proposed solutions for the modern city** *Acta Horticulturae*, 2013. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84892716812&doi=10.17660%2FActaHortic.2013.1004.3&partnerID=40&md5=423a7de17cc7e76f0db9cca1b1e4bdcc>>

HUNTER, D. C.; BURRITT, D. J. Light quality influences adventitious shoot production from cotyledon explants of lettuce (*Lactuca sativa* L.). **In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant**, v. 40, n. 2, p. 215–220, 24 mar. 2004.

INMETRO. **Tabelas de consumo/eficiência energética de condicionadores de ar**. Disponível em: <<http://inmetro.gov.br/consumidor/pbe/condicionadores.asp>>. Acesso em: 15 ago. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Gráficos Climatológicos (1931-1960 e 1961-1990): Estação Campo Grande/MS**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos>>. Acesso em: 20 set. 2018.

JARA, F. A. V. **Fundaciones para turbinas eólicas costa afuera**. *Revista ingeniería de construcción*. Scielo cl., 2009.

KANG, J. H. et al. Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory system. **Horticulture Environment and Biotechnology**, v. 54, n. 6, p. 501–509, 2013.

KATO, K. et al. Molecular Breeding of Tomato Lines for Mass Production of Miraculin in a Plant Factory. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 17, p. 9505–9510, 8 set. 2010.

KOONTZ, H. V; PRINCE, R. P. Effect of 16 and 24 hours daily radiation (light) on lettuce growth. **HortScience: a publication of the American Society for Horticultural Science**, v. 21, n. 1, p. 123–124, 1986.

KRETSCHMER, B. F.; KOLLENBERG, M. E. Can Urban Agriculture Feed a Hungry World ? p. 7–11, 2011.

LABORATÓRIO NACIONAL DO DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS EUA. **OpenStudio**. Disponível em: <<https://www.openstudio.net/>>. Acesso em: 4 nov. 2018.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. DE A. **Metodologia do Trabalho Científico**. 4<sup>a</sup> ed. São Paulo/SP: Atlas, 1992.

LAMBIN, E. F. et al. Estimating the world's potentially available cropland using a bottom-up approach. **Global Environmental Change**, v. 23, n. 5, p. 892–901, 1 out. 2013.

LI, Q.; KUBOTA, C. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. **Environmental and Experimental Botany**, v. 67, n. 1, p. 59–64, 1 nov. 2009.

LINSLEY-NOAKES, G.; WILKEN, L.; DE VILLIERS, S. HIGH DENSITY, VERTICAL HYDROPONICS GROWING SYSTEM FOR STRAWBERRIES. **Acta Horticulturae**, n. 708, p. 365–370, maio 2006.

LIU, W.; CHEN, D. K.; LIU, Z. X. HIGH EFFICIENCY COLUMN CULTURE SYSTEM IN CHINA. **Acta Horticulturae**, n. 691, p. 495–500, out. 2005.

LOPES, C. A.; QUEZADO DUVAL, A. M.; REIS, A. **Doenças da alface**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2010.

LUCENA, L. P. DE. **MODELO URBANO DE PRODUÇÃO RURAL VERTICALIZADO COMO ALTERNATIVA DE SEGURANÇA ALIMENTAR ÀS GRANDES CIDADES: UM ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA E ORGANIZACIONAL DO MODELO VERTICAL CANADENSE E DO MODELO HORIZONTAL BRASILEIRO**. [s.l.] UFRS, 2014.

MACIAS, T. Working Toward a Just, Equitable, and Local Food System: The Social Impact of Community-Based Agriculture. **Social Science Quarterly**, v. 89, n. 5, p. 1086–1101, 30 set. 2008.

MADURO-ABREU, A. et al. Os limites da Pegada Ecológica. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 19, p. 73–87, 2009.

MAHDAVI, S. et al. Vertical mobile planting system consistent with the pattern of solar radiation and effects of system on light exposure and growth of Gerbera cut flowers (*Gerbera jamesonii* cv. Antibes), in greenhouse culture. **Journal of Agricultural Technology**, v. 8, n. 4, p. 1461–1468, 2012.

MARTINO, J. **Como cultivar sua própria comida sem terrenos agrícolas**. Disponível em: <<http://myeclinic.com/grow-food-without-land/>>. Acesso em: 3 set. 2018.

MARTINS, L. T. C. **Como montar uma hidroponia**. Sebrae, [s.d.]. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/ideias/como-montar-uma-hidroponia,02387a51b9105410VgnVCM1000003b74010aRCRD>>

MATZENBERGER, J.; SCHIPFER, F. Assessment for Microalgae Production in Photo-Bioreactors for Vertical Farming in Urban Areas. **Igarss 2014**, n. 1, p. 1–5, 2014.

MAX, A. **Future farm: a sunless, rainless room indoors**. Disponível em: <<https://www.smh.com.au/technology/future-farm-a-sunless-rainless-room-indoors-20110411-1db87.html>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

MAYNARD, D. N.; HOCHMUTH, G. J. **Handbook For Vegetable Growers**. [s.l: s.n.]. v. 83

MEAH, K.; ULA, S.; BARRETT, S. Solar photovoltaic water pumping-opportunities and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 4, p. 1162–1175, 2008.

MENDONÇA, P. **Habitar sob uma segunda pele : estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados**. [s.l: s.n.].

MINIGARDEN. **Minigarden – Jardins Verticais e Sistemas de Cultivo**. Disponível em: <<https://pt.minigarden.net/>>. Acesso em: 3 set. 2018.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **COLEÇÃO CADERNOS TÉCNICOS DE REGULAMENTAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE INSTRUMENTOS DO ESTATUTO DA CIDADE**. 3ª ed. Brasília: [s.n.].

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/Atlas do Potencial Eolico Brasileiro.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf)>. Acesso em: 20 ago. 2018.

MOUGEOT, L. J. A. Urban agriculture: Definition, presence, potentials and risks, and policy challenges. **Cities feeding people series; rept. 31**, 2000.

MULLER, A. et al. Can soil-less crop production be a sustainable option for soil conservation and future agriculture ? **Land Use Policy**, v. 69, n. December 2016, p. 102–105, 2017.

NEOCLEOUS, D. et al. **Horizontal and vertical soilless growing systems under Cyprus conditions**. [s.l: s.n.]. v. 12

NEOSOLAR. **Painel Solar Fotovoltaico 330W - Yingli YL330P-35B**. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-yingli-yl330p-35b-330wp.html>>. Acesso em: 16 ago. 2019.

NICOLE, C. C. S. et al. Lettuce growth and quality optimization in a plant factory. **Acta Horticulturae**, v. 1134, p. 231–238, 2016.

NOGUEIRA, E. S. Iluminação com LEDs: alternativa de substituição da instalação existente da subestação Jataí. 2011.

OHSE, S. et al. Quality of Lettuce Cultivars Grown in Hydroponic Solution. **Scientia**, n. August, p. 181–185, 2001.

OKAMOTO, K.; YANAGI, T.; KONDO, S. GROWTH AND MORPHOGENESIS OF LETTUCE SEEDLINGS RAISED UNDER DIFFERENT COMBINATIONS OF RED AND BLUE LIGHT. **Acta Horticulturae**, n. 435, p. 149–158, jan. 1997.

OLIVEIRA, L. S. DE. **Gestão do consumo de energia elétrica no campus da UnB**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2006.

OLIVEIRA, V. M. DE. **GESTÃO ENERGÉTICA EM UM CLUBE RECREATIVO**. [s.l.] UFMS, 2017.

ONU. **ONU: após uma década de queda, fome volta a crescer no mundo**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/onu-apos-uma-decada-de-queda-fome-volta-a-crescer-no-mundo/>>. Acesso em: 10 nov. 2017.

PANDURO, A. M. R. **Análise do comportamento da alface (*Lactuca sativa* L.), sob diferentes condições de iluminação**. [s.l.] ESALQ, 1986.

PAULA JÚNIOR, T. J. DE.; VENZON, M. (COORD. ). **101 culturas manual de tecnologias agrícolas**. [s.l.] EPAMIG, 2007.

PHILIPS. **Horticulture LED solutions**, 2018. Disponível em: <[www.philips.com/horti](http://www.philips.com/horti)>

PRATES, G. A. **ECODESIGN UTILIZANDO QFD, MÉTODOS TAGUCHI E DFE**. [s.l.] UFSC, 1998.

REZENDE, J. L. P. DE; OLIVEIRA, A. D. DE. **Análise econômica e social de projetos florestais**. 2<sup>a</sup> ed. ed. Viçosa MG: UFV, 2008.

RITTER, E. et al. Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers. **Potato Research**, v. 44, n. 2, p. 127–135, 2001.

ROVER, S.; OLIVEIRA, J. L. B.; NAGAOKA, M. DA P. T. Viabilidade econômica da implantação de sistema de cultivo de alface hidropônica. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 15, n. 3, p. 169–179, 2016.

SAMPAIO, R. ; MANCINI, M. . Estudos de revisão sistemática : um guia para síntese. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, v. 11, p. 83–89, 2007.

SANCHEZ, S. V. Avaliação de cultivares de alface crespa produzidas em hidroponia tipo NFT em dois ambientes protegidos em Ribeirão Preto (SP). 2007.

SANJUAN-DELMÁS, D. et al. Environmental assessment of an integrated rooftop greenhouse for food production in cities. **Journal of Cleaner Production**, v. 177, p. 326–337, 2018.

SANTOS, C. D. DOS. A formação e produção do espaço urbano: discussões preliminares acerca da importância das cidades médias para o crescimento da rede urbana brasileira. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 5, n. 1, p. 177–190, 2009.

SAVVAS, D.; PASSAM, H. **Hydroponic production of vegetables and ornamentals**. Athens, Greece: Embryo Publications, 2002.

SCHLUSSLER, L. Vertical vs. Horizontal. **Scientific American**, v. 302, n. 3, p. 10–10, 2010.

SGANZERLA, E. **Nova agricultura: a fascinante arte de cultivar com os plásticos**. [s.l.] Petroquímica Triunfo Porto Alegre, 1990.

SILVA, C. F. E. **Simulação em DesignBuilder Essencial**. Disponível em: <<https://qualia.eadplataforma.com/course/index/2/2>>. Acesso em: 14 ago. 2019.

SILVA, E. T. DA; SCHWONKA, F. VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A PRODUÇÃO DE ALFACE NO SISTEMA HIDROPÔNICO EM COLOMBO, REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA, PR. **Scientia Agraria**, v. 2, n. 1, p. 111, 31 dez. 2001.

SIVAMANI, S.; KWAK, K.; CHO, Y. A design of web-based services using RESTful API for vertical farm. **Life Science Journal**, v. 11, n. 7, p. 763–767, 2014.

SKY GREENS. **Sky Greens**. Disponível em: <<https://www.skygreens.com/#>>. Acesso em: 3 set. 2018.

SMIL, V. It'll be harder than we thought to get the carbon out [Blueprints for a Miracle]. **IEEE Spectrum**, v. 55, n. 6, p. 72–75, 2018.

TAKLE, E.; HOFSTRAND, D. **Global warming – agriculture's impact on greenhouse gas emissions**. Disponível em: <<https://www.extension.iastate.edu/agdm/articles/others/TakApr08.html>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

TILMAN, D. et al. Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature**, v. 418, p. 671, 8 ago. 2002.

TOULIATOS, D.; DODD, I. C.; MCAINSH, M. Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics. **Food and Energy Security**, v. 5, n. 3, p. 184–191, 2016.

TSITSIMPELIS, I.; WOLFENDEN, I.; TAYLOR, C. J. Development of a grow-cell test facility for research into sustainable controlled-environment agriculture. **Biosystems Engineering**, v. 150, p. 40–53, 2016.

UNITED NATIONS. **World Urbanization Prospects: Percentage of Population at Mid-Year Residing in Urban Areas by region, subregion and country, 1950-2050**. Disponível em: <<https://esa.un.org/unpd/wup/Download/>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

UNITED NATIONS NEWS CENTRE. **World population to hit 9.8 billion by 2050, despite nearly universal lower fertility rates – UN**. Disponível em: <<http://www.un.org/apps/news/story.asp?NewsID=57028#.WgXw72hSx9C>>. Acesso em: 10 nov. 2017.

UREÑA-SÁNCHEZ, R. et al. **Greenhouse tomato production with electricity generation by roof-mounted flexible solar panels** *Scientia Agricola* scielo, 2012.

VILJOEN, A.; HOWE, J. **Continuous productive urban landscapes**. [s.l.] Routledge, 2012.

WALSH, B. **America's food crisis and how to fix it**. [s.l: s.n.]. v. 174

WAVEFORM LIGHTING. **Convert PPF to Lux - Online Calculator**. Disponível em: <<https://www.waveformlighting.com/horticulture/convert-ppfd-to-lux-online-calculator>>. Acesso em: 20 set. 2018a.

WAVEFORM LIGHTING. **Convert Lumens to PPF - Online Calculator**. Disponível em: <<https://www.waveformlighting.com/horticulture/convert-lumens-to-ppf-online-calculator>>. Acesso em: 14 ago. 2019b.

WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. **Introdução ao EnergyPlus**. Florianópolis, SC. UFSC,

2006.

WORLDOMETERS. **Estatísticas do mundo em tempo real**. Disponível em: <<https://www.worldometers.info/br/>>. Acesso em: 20 ago. 2019.

WWF. **Pegada Ecológica Global**. Disponível em: <[https://www.wwf.org.br/natureza\\_brasileira/especiais/pegada\\_ecologica/pegada\\_ecologica\\_global/](https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/especiais/pegada_ecologica/pegada_ecologica_global/)>. Acesso em: 10 nov. 2017.

YANO, A.; ONOE, M.; NAKATA, J. Prototype semi-transparent photovoltaic modules for greenhouse roof applications. **Biosystems Engineering**, v. 122, p. 62–73, 1 jun. 2014.

YEANG, K. **Ecodesign : a manual for ecological design**. [s.l.: s.n.].

YEH, N.; CHUNG, J. P. High-brightness LEDs-Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 8, p. 2175–2180, 2009.

YILDIZ, A.; OZGENER, O.; OZGENER, L. Energetic performance analysis of a solar photovoltaic cell (PV) assisted closed loop earth-to-air heat exchanger for solar greenhouse cooling: An experimental study for low energy architecture in Aegean Region. **Renewable Energy**, v. 44, p. 281–287, 1 ago. 2012.

## 8 ANEXOS

**Anexo A** – Propriedades térmicas edilícias utilizadas como dados de entrada na simulação dentro do *software DesignBuilder*.

Parede de blocos de concreto – externa <span style="float: right;">U = 3,737 W/(m².K)</span>									
Material	Espes.	Template utilizado	$\lambda$ W/(m.K)	c kJ/(kg.K)	$\rho$ kg/m³	R	$\alpha$	$\varepsilon$	cor
Tinta acrílica	0,1 cm	PVC	0,17	0,9	1.390	----	0,10	0,90	Branco fosco
Massa acrílica	0,1 cm	Acrylic	0,2	1,46	1.200	----	0,20	0,91	Branco
Reboco	1,5 cm	Mortar	1,15	1,0	2.000	----	----	-----	-----
Bloco de concreto	9,0 cm	Concret block heavyweight	1,75	1,0	2,400	0,16	----	-----	-----
Reboco	1,5 cm	Mortar	1,15	1,0	2.000	----	----	-----	-----
Massa PVA	0,1 cm	Polyacetate	0,3	1,4	1.410	----	0,30	0,90	Branco
Tinta látex PVA	0,1 cm	PVC	0,17	0,9	1.390	----	0,11	0,90	Branco fosco
Parede de blocos de concreto – interna <span style="float: right;">U = 3,76 W/(m².K)</span>									
Material	Espes.	Template utilizado	$\lambda$ W/(m.K)	c kJ/(kg.K)	$\rho$ kg/m³	R	$\alpha$	$\varepsilon$	cor
Tinta látex PVA	0,1 cm	PVC	0,17	0,9	1.390	----	0,11	0,90	Branco fosco
Massa PVA	0,1 cm	Polyacetate	0,3	1,4	1.410	----	0,30	0,90	Branco
Reboco	1,5 cm	Mortar	1,15	1,0	2.000	----	----	-----	-----
Bloco de concreto	9,0 cm	Concret block heavyweight	1,75	1,0	2,400	0,16	----	-----	-----
Reboco	1,5 cm	Mortar	1,15	1,0	2.000	----	----	-----	-----
Massa PVA	0,1 cm	Polyacetate	0,3	1,4	1.410	----	0,30	0,90	Branco
Tinta látex PVA	0,1 cm	PVC	0,17	0,9	1.390	----	0,11	0,90	Branco fosco

Parede de bloco de concreto externa - banheiros										U = 3,681 W/(m <sup>2</sup> .K)
Material	Espes.	Template utilizado	$\lambda$ W/(m.K)	c kJ/(kg.K)	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	R	$\alpha$	$\epsilon$	cor	
Tinta acrílica	0,1 cm	PVC	0,17	0,9	1.390	-----	0,10	0,90	Branco fosco	
Massa acrílica	0,1 cm	Acrylic	0,2	1,46	1.200	-----	0,20	0,91	Branco	
Reboco	1,5 cm	Mortar	1,15	1,0	2.000	-----	-----	-----	-----	
Bloco de concreto	9,0 cm	Concret block heavyweight	1,75	1,0	2,400	0,16	-----	-----	-----	
Reboco	1,5 cm	Mortar	1,15	1,0	2.000	-----	-----	-----	-----	
Argamassa de assentamento	0,5 cm	Mortar	1,15	1,0	2.000	-----	-----	-----	-----	
Revestimento cerâmico	0,8 cm	Ceramic/Clay tiles	0,9	0,92	1.600	-----	-----	-----	Branco	
Laje com forro de gesso acartonado										U = 1,747 W/(m <sup>2</sup> .K)
Material	Espes.	Template utilizado	$\lambda$ W/(m.K)	c kJ/(kg.K)	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	R	$\alpha$	$\epsilon$	cor	
Contrapiso acabado	3,0 cm	Concrete, médium density	1,75	1,0	2.200	-----	-----	-----	-----	
Concreto armado	4,0 cm	Cast concrete	1,13	1,0	2,000	-----	-----	-----	-----	
Bloco cerâmico	8,0 cm	Masonry – Heavyweight dry	1,05	0,920	2.000	0,18	-----	-----	-----	
Reboco	2,0 cm	Mortar	1,15	1,0	2.000	-----	-----	-----	-----	
Air gap	10 cm	Air gap 100mm (downwards)	0,3	1,0	1.000	0,22	-----	-----	-----	
Gesso acartonado	2,0 cm	Gypsum Plasterboard	0,35	0,84	900	-----	-----	-----	-----	
Massa PVA	0,1 cm	Polyacetate	0,3	1,4	1.410	-----	0,30	0,90	Branco	
Tinta látex PVA	0,1 cm	PVC	0,17	0,9	1.390	-----	0,11	0,90	Branco fosco	
Piso de concreto armado										U = 2,865 W/(m <sup>2</sup> .K)
Material	Espes.	Template utilizado	$\lambda$ W/(m.K)	c kJ/(kg.K)	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	R	$\alpha$	$\epsilon$	cor	
Contrapiso acabado	3,0 cm	Concrete, médium density	1,75	1,0	2.200	-----	-----	-----	-----	
Concreto armado	7,0 cm	Cast concrete	1,13	1,0	2.000	-----	-----	-----	-----	
Cobertura										U = 0,676 W/(m <sup>2</sup> .K)

Material	Espes.	Template utilizado	$\lambda$ W/(m.K)	c kJ/(kg.K)	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	R	$\alpha$	$\varepsilon$	cor
Tinta branca	0,1 cm	<i>Acrylic</i>	0,17	0,9	1,390	-----	0,20	0,90	Branco
Telha de aço	0,05 cm	<i>Metals - Steel</i>	55,0	0,46	7.800	-----	-----	-----	-----
Poliuretano	4,0 cm	<i>Polturethane</i>	0,03	1,67	35	-----	-----	-----	-----
Telha de aço	0,05 cm	<i>Metals - Steel</i>	55,0	0,46	7.800	-----	-----	-----	-----
<b>Legenda:</b> U – transmitância térmica - W/(m <sup>2</sup> .K) $\rho$ – densidade - kg/m <sup>3</sup> $\alpha$ – absorptância $\lambda$ – condutividade térmica - W/(m.K)      R – resistência térmica $\varepsilon$ - emissividade c – calor específico - kJ/(kg.K)									

Fonte: adaptado de NBR 15220 (2003), DesignBuilder (s.d.), Dornelles (2008) e MENDONÇA (2005).