



**UNIVERSIDADE FEDERAL VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

MIGUEL ÂNGELO DE OLIVEIRA SHAW

**EFICIÊNCIA TÉRMICA DE COBERTURAS VENTILADAS:
ESTUDOS NO CLIMA TROPICAL SEMIÁRIDO**

**JUAZEIRO – BA
(2018)**

**UNIVERSIDADE FEDERAL VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

MIGUEL ÂNGELO DE OLIVEIRA SHAW

**EFICIÊNCIA TÉRMICA DE COBERTURAS VENTILADAS:
ESTUDOS NO CLIMA TROPICAL SEMIÁRIDO**

Trabalho apresentado a Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro, como requisito da obtenção de título de mestre em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cristiane Dacanal

**JUAZEIRO – BA
(2018)**

	Shaw, Miguel Ângelo de Oliveira.
S535e	Eficiência térmica de coberturas ventiladas: estudos no clima tropical no semiárido/ Miguel Ângelo de Oliveira Shaw. – Juazeiro-BA, 2018.
	xii , 51 f.: il. ; 29 cm.
	Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro-BA, 2018.
	Orientador (a): Prof. ^a Dr. ^a Cristiane Dacanal.
	1. Construção Rural. 2. Ventilação Natural. Conforto térmico. I. Título. II. Dacanal, Cristiane. III. Universidade Federal do Vale do São Francisco.
	CDD 631.2

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Integrado de Biblioteca SIBI/UNIVASF
Bibliotecário: Renato Marques Alves

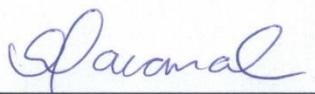
UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
MESTRADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

FOLHA DE APROVAÇÃO

Miguel Ângelo de Oliveira Shaw

**“ EFICIÊNCIA TÉRMICA DE COBERTURAS VENTILADAS: ESTUDOS
NO CLIMA TROPICAL SEMIÁRIDO”**

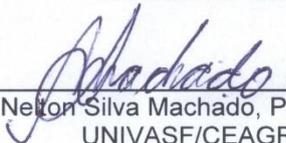
Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação *Strito Sensu* em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, como requisito parcial para obtenção do título de mestre.



Cristiane Dacanal, Profa. D.Sc.
UNIVASF/CPGEA



Paulo Gustavo Serafim de Carvalho, Prof. DSc.
UNIVASF/CPGEA



Nelson Silva Machado, Prof. D.Sc.
UNIVASF/CEAGRO

Juazeiro-BA, 26 de Março de 2018.

Dedico esta obra a meus pais, Miguel
Ângelo Mello Mattos Shaw da Silva e
Marileuza Rosa de Oliveira e a minha
namorada Iris dos Santos Ferreira...

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me ter dado forças e sempre me orientar a trilhar o caminho correto;

Aos meus pais, pois ambos, com muita dedicação, sempre me aconselharam a buscar o meu melhor, incentivando-me em pesquisas, despertando o “ar” de curiosidade que existia em mim;

Aos professores da UNIVASF, que contribuíram com o meu aprendizado desde a graduação até o término desta etapa, incluindo a minha orientadora Prof^a. Dra. Cristiane Dacanal, que sempre me estimulou fazendo ressalvas persistentes e eficazes, fazendo com que buscase o melhor de um discente que deu prosseguimento ao saber científico, fornecendo alternativas, sugestões, fazendo críticas construtivas para que este trabalho alcançasse um bom índice de satisfação.

Agradeço também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pela bolsa prestada durante esta etapa da minha vida.

À equipe da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), pelo auxílio e receptividade em uma etapa da pesquisa, em especial ao Edson Matsumoto e a Prof^a.Dsc. Lucila Chebel Labaki, por disporem de seu tempo e conhecimento prático, auxiliando-me a utilizar o túnel de vento do Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada (LaCAF) da Unicamp.

Ao Prof. Dr. José Bismark de Medeiros, que ao longo desta empreitada se tornou um grandíssimo amigo e conselheiro.

À minha namorada Iris dos Santos Ferreira, por me conhecer tão bem, zelar de mim, buscar elevar sempre meu potencial, ser meu porto seguro inúmeras vezes, me amar e mesmo não conhecendo nada a respeito do tema, me incentivar, me iluminar, me aconselhar, me ajudar, e até mesmo me inspirar muitas vezes.

Aos meus amigos e parceiros de trabalho Murilo Santos Freire, Marcos Antônio de Oliveira, Carolina Torres, Fabiano Pinheiro Amorim, Anderson Breno e Osvaldo Campelo por dividirem comigo seus conhecimentos, dispor do seu tempo para explicações - nem sempre breves, ajudando-me em meu crescimento profissional.

Agradeço a todos pelo companheirismo e compartilhamento dos conhecimentos comigo. Afinal, todos eles me ajudaram nessa empreitada de alguma forma. Portanto, meu muito obrigado a todos.

“Acredito que existem dois tipos de pessoas no mundo: aqueles que reclamam e aqueles que fazem”

SHAW, M.A.O.; **Eficiência Térmica de Coberturas Ventiladas: Estudos no Clima Tropical Semiárido**. 2018. 63f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Colegiado de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro-BA, 2018.

RESUMO

A ventilação natural em galpões agrícolas desempenha um papel fundamental para proporcionar um nível aceitável de conforto térmico. A cobertura ventilada é uma importante estratégia bioclimática para amenizar a carga térmica em galpões agrícolas. Sendo assim, esta dissertação teve como objetivo determinar o melhor tipo de cobertura ventilada para galpões agrícolas, visando o desempenho térmico no clima Tropical Semiárido. A metodologia constou de simulação computacional da carga térmica e ensaio em túnel de vento. Para o ensaio em túnel de vento, construíram-se modelos reduzidos de galpões agrícolas com três variações na cobertura ventilada (*Shed*, Lanternim e Arco Independente), em madeira compensada de média densidade (MDF). As velocidades de rotação do ventilador variaram entre 150 e 800 RPM, com o vento perpendicular à fachada. Já para a simulação da carga térmica no EnergyPlus™, confeccionaram-se modelos virtuais dos galpões com coberturas em *Shed* e em Lanternim, com e sem forro de gesso, utilizando o OpenStudio® SketchUp Plug-in. A simulação foi realizada para um dia típico de verão, obtido através do método do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, considerando-se os dados climáticos de Petrolina-PE. Os modelos virtuais foram orientados em diferentes ângulos em relação ao Norte e orientação dos ventos predominantes. Com relação aos resultados, os testes no túnel de vento mostraram maior circulação de ar interna no Arco independente, seguido do Lanternim, dependendo da rotação do ventilador. Ambos não tiveram diferenças significativas estatisticamente. O *Shed* como captador e como extrator de ar apresentou menores velocidades, sem diferenças significativas pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade. As simulações computacionais permitiram concluir que a carga térmica do *Shed* como extrator de vento na orientação longitudinal Leste-Oeste foi a menor dentre as simuladas, sendo a melhor opção de ático ventilado dentre as testadas. O forro de gesso diminuiu a carga térmica interna no galpão em 30% no *Shed*, e 7% no Lanternim. Ao confrontar os resultados obtidos nos testes no túnel de vento com os das simulações no EnergyPlus™, concluiu-se que quanto menor a ventilação interna, menor a carga térmica no galpão.

Palavras-chaves: Ventilação Natural. Ático Ventilado. Túnel de Vento. EnergyPlus. Ambiência Agrícola. Construção Rural.

SHAW, M.A.O.; **Thermal Efficiency of Ventilated Attic: Studies in Semi-Arid Tropical Climate**. 2018. 63f. Dissertation (Master in Agricultural Engineering) – Colegiado de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro-BA, 2018.

ABSTRACT

Natural ventilation in agricultural warehouses plays a key role in providing an acceptable level of thermal comfort. Ventilated roofing is an important bioclimatic strategy to ease the thermal load in agricultural warehouses. Thus, this dissertation aimed to determine the best type of ventilated cover for agricultural warehouses, aiming at thermal performance in the semi-arid tropical climate. The methodology consisted of computational simulation of the thermal load and wind tunnel test. For the wind tunnel test, reduced models of agricultural warehouses with three variations in ventilated roofing (Saw-tooth roof, Lantern Roof Ridge and Arched Roof) were constructed in medium density plywood (MDF). The fan rotational speeds ranged from 150 to 800 RPM, with the wind perpendicular to the façade. As for the thermal load simulation in the EnergyPlus™, virtual models of the Saw-tooth roof and Lantern Roof Ridge with and without gypsum lining were made using the OpenStudio® SketchUp Plug-in. The simulation was performed for a design summer day, obtained through the method of the Instituto de Pesquisas Tecnológicas, considering the weather data of Petrolina-PE. The virtual models were oriented at different angles in relation to the North and orientation of the prevailing winds. Regarding the results, tests in the wind tunnel showed greater internal air circulation in the independent Arched Roof, followed by the Lantern Roof Ridge, depending on the rotation of the fan. Both had no statistically significant differences. The Saw-tooth roof as collector and as air extractor presented lower velocities, without significant differences by Tukey Test at 5% probability. The computational simulations allowed us to conclude that the thermal load of the Saw-tooth roof as a windbreaker in the east-west longitudinal orientation was the lowest among the simulated ones, being the best attic option ventilated among the tested ones. The plaster lining decreased the internal heat load in the warehouse by 30% in the Saw-tooth roof, and 7% in the Lantern Roof Ridge. When comparing the results obtained from tests in the wind tunnel with those of the simulations in EnergyPlus™, it was concluded that the lower the internal ventilation, the lower the thermal load in the warehouse.

Keywords: Natural Ventilation. Ventilated Roofing. Wind Tunnel. EnergyPlus. Agricultural Environment. Rural Building.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Elementos para a ventilação de coberturas. edificações com forro e sem forro. Fonte: Autor.	15
Figura 2: Esquema de solução integrada. FONTE: adaptado de <i>EnergyPlus</i> TM (2013).	31
Figura 3: Ilustração geral do túnel de vento do LaCAF. Fonte: Galter et al (2015). ..	34
Figura 4: Vista interna do túnel de vento do LaCAF.	34
Figura 5: Equações polinomiais das velocidades calibradas em função da tensão. .	35
Figura 6: Calibração dos anemômetros	36
Figura 7: Distribuição dos sensores no modelo reduzido.	36
Figura 8: Galpões ensaiados no túnel de vento. a) cobertura em <i>Shed</i> como captador de vento b) cobertura em <i>Shed</i> como extrator de vento. c) Lanternim; d) Arco independente.	37
Figura 9: Medidas reais dos galpões agrícolas. A) <i>Shed</i> ; B) Lanternim; C) Arco Independente.	38
Figura 10: Modelo tridimensional de galpão agrícola de pequeno porte. A) Lanternim; b) <i>Shed</i> . Quadro 1: Propriedades térmicas dos materiais de construção utilizados no OpenStudio® Sketchup plug-in. Fonte: ABNT (2005).	40
Figura 11: Sombreamentos nas coberturas em Lanternim e em <i>Shed</i> nas diferentes orientações solares.	42
Figura 12: Gráfico da média das temperaturas máximas (°C) em função dos meses do ano.	44
Figura 13: Determinação da temperatura típica de verão (°C).	45
Figura 14: Possíveis dias típicos de projeto (°C).....	46
Figura 15: Radiação solar horária x hora	47
Figura 16: Velocidade do ar em função da rotação no do túnel de vento para as seguintes coberturas sem forro. A - <i>Shed</i> , a 0°; B - <i>Shed</i> , a 180°; C - Lanternim; D - Arco independente	49
Figura 17: Relação entre a razão das velocidades dentro da edificação e a rotação do ventilador.....	52
Figura 18: Carga térmica [kW] do <i>Shed</i> e do Lanternim em diversas orientações solar, com e sem forro.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coeficiente de descarga para diferentes tipos de aberturas. Fonte: Bittencourt e Cândido (2015).....	23
Tabela 2: Razão da velocidade nos diferentes tipos de galpões com forro.	48
Tabela 3: Razão da velocidade nos diferentes tipos de galpões sem forro.	50
Tabela 4: Razão da velocidade nos diferentes tipos de galpões sem forro.	51

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT** - Associação Brasileira de Normas Técnica
- ANVISA** - Agência Nacional de Vigilância Sanitária
- ASHRAE** - American Soceity Of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers
- BLAST** - Building Loads Analysis And System Thermodynamics
- CERL** - Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Construção do Exército dos Estados Unidos
- CFD** - Dinâmica Fluido Computacional
- DOE** - Departamento de Energia dos Estados Unidos.
- DOE-2** - Department of Energy-2
- DVS** - Diretoria de Vigilância Sanitária
- FAO** - Food and Agriculture Organization
- INMET** - Instituto Nacional de Meteorologia
- IPT** - Instituto de Pesquisas Tecnológicas
- IWEC** - International Weather for Energy Calculations
- LaCAF** - Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada
- LBNL** - Laboratório Nacional Lawrence Berkeley
- MDF** - Medium Density Fiberboard
- NBR** - Norma Brasileira
- OSU** - Universidade do Estado de Oklahoma
- PMOC** - Plano de Manutenção, Operação e Controle
- QAI** - Qualidade do Ar Interno
- UI** - Universidade de Illinois
- UNIVASF** - Universidade Federal do Vale do São Francisco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	17
2.1. OBJETIVO GERAL	17
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1. VENTO E VENTILAÇÃO NATURAL	18
3.2. VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES.	19
3.2.1. VENTILAÇÃO NATURAL POR AÇÃO DOS VENTOS.....	19
3.2.2. VENTILAÇÃO NATURAL DEVIDO ÀS DIFERENÇAS DE TEMPERATURAS	20
3.3. VENTILAÇÃO E QUALIDADE DO AR INTERIOR.	23
3.4. ÁTICOS VENTILADOS	26
3.5. MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DA VENTILAÇÃO EM EDIFICAÇÕES	28
3.5.1. TÚNEL DE VENTO	28
3.5.2. <i>ENERGYPLUS</i> TM	30
4. METODOLOGIA	33
4.1. ENSAIOS DE MODELOS REDUZIDOS EM TÚNEL DE VENTO	33
4.1.1. TÚNEL DE VENTO DO LACAF	33
4.1.2. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES.....	35
4.1.3. MODELOS REDUZIDOS	37
4.2. SIMULAÇÃO DA CARGA TÉRMICA NO <i>ENERGYPLUS</i> TM	39
4.2.1. DETERMINAÇÃO DO DIA TÍPICO DE VERÃO PELO MÉTODO DO IPT	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1. ENSAIO EM TÚNEL DE VENTO	48
5.2. SIMULAÇÃO NO <i>ENERGYPLUS</i> TM	52
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1. INTRODUÇÃO

A região do Vale do Submédio São Francisco, localizada no Nordeste brasileiro, tem seu desenvolvimento voltado à fruticultura irrigada, destacando-se nacionalmente nesse setor. O clima regional é Tropical Semiárido, seco e muito quente, com máxima precipitação em março e mínima em agosto, apresentando balanço hídrico negativo, resultante de precipitações médias anuais inferiores a 800 mm (ALVARES et al., 2014).

A região possui uma oferta bastante alta de radiação solar, apresentando elevados valores tanto de insolação quanto de radiação solar global (TEIXEIRA, 2010). Tendo em vista as características climáticas e a vocação econômica da região, é necessário ampliar os conhecimentos a respeito da eficiência térmica das edificações, a fim de minimizar o consumo energético com o uso de sistemas de condicionamento artificial, bem como melhorar as condições de conforto térmico dos usuários.

Estudos comprovam que o tipo de telha e a presença de forro influenciam no ganho térmico das instalações, a inclinação da cobertura pode ser outro fator determinante (SAMPAIO et al., 2008; CRAVO et al., 2015). Além disso, A cobertura ventilada (áticos ventilados) pode aumentar a vida útil da madeira, aumentando assim a durabilidade do seu telhado, através da renovação do ar (YU E MOORE, 2014)

Os áticos ventilados (Figura 1), elemento superior da fachada situado acima das cornijas (faixa horizontal que se destaca da parede), guarnecido ou pilastras, ocultando o telhado, auxiliam na redução da carga térmica das edificações através das trocas convectivas na camada de ar entre as telhas e o forro (LUKIANCHUKI et al., 2014).

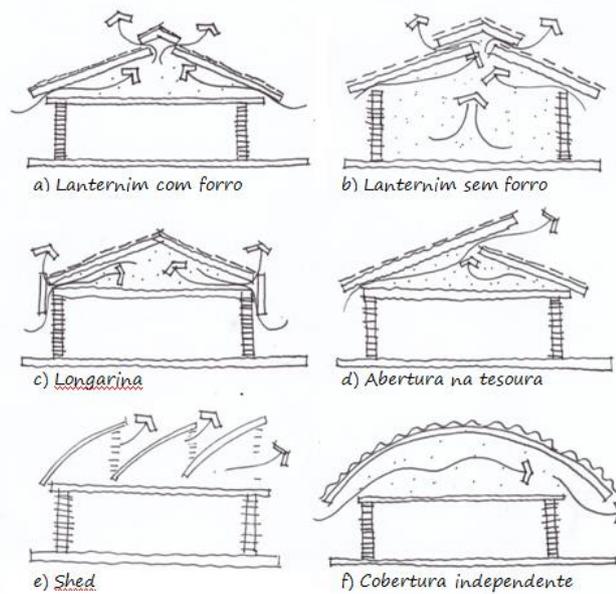


Figura 1: Elementos para a ventilação de coberturas. edificações com forro e sem forro. Fonte: Autor.

A ventilação natural, definida como um processo em que ocorre a renovação do ar (convecção natural) em um ambiente fechado sem a utilização de aparelhos mecânicos (SACHT et al., 2016), é o escopo principal desta dissertação. Em edificações, tal processo ocorre em uma ou mais aberturas no envelope do prédio, podendo ocorrer pela ação dos ventos, denominada de ventilação dinâmica, e/ou pela diferença de temperatura, denominada de ventilação térmica (GRAÇA e LINDEM, 2016).

Outro tópico importante com relação às aberturas diz respeito ao Plano Nacional de Eficiência Energética (PROCEL EDIFICA). Este plano vem incentivando o desenvolvimento e o uso de materiais construtivos que promovam a eficiência energética. Assim, as edificações devem ser confortáveis e adequadas ao clima local, além de energeticamente eficientes e com baixo custo de manutenção, causando, necessariamente, baixo impacto ambiental, diminuindo os recursos de sistemas de iluminação e climatização.

Ainda dentro desse panorama, pode-se afirmar que pouco se conhece sobre o desempenho das coberturas ventiladas, assim como pode-se notar a importância de tal estudo para a redução de gastos energéticos. Assim, considerando a necessidade de avanços nas pesquisas de Ambiente adequadas ao clima Tropical Semiárido, que ocorre em Petrolina - PE e Juazeiro - BA, justificou-se o desenvolvimento desta

dissertação. Para tal, avaliou-se coberturas ventiladas em galpões agrícolas por meio de:

- Ensaio em túnel de vento
- Desempenho térmico, no *EnergyPlus*TM.

Logo, a partir dos ensaios previstos, fez-se uma avaliação da eficácia de três tipos de coberturas naturalmente ventiladas, com e sem forro, para determinar e classificar o potencial dos áticos ventilados.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Determinar, por meio de ensaios em túnel de vento e ensaios energético no *software EnergyPlus*TM, o melhor tipo de cobertura ventilada para galpões agrícolas visando o desempenho térmico, para o clima Tropical Semiárido do tipo BSh (classificação climática de Köppen).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Identificar, na literatura, arquiteturas frequentes de coberturas ventiladas utilizadas em galpões agrícolas;
- ii. Confeccionar modelos reduzidos que representem as edificações com coberturas ventiladas;
- iii. Realizar ensaios de maquetes em túnel de vento;
- iv. Simular a carga térmica de galpões agrícolas com coberturas ventiladas no *software* computacional *EnergyPlus*TM.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. VENTO E VENTILAÇÃO NATURAL

O vento, dentre muitas definições, pode ser conceituado como um fenômeno meteorológico desenvolvido através do movimento das massas de ar na atmosfera, devido às diferenças de pressão atmosférica, entre duas regiões distintas (COSTA e LYRA, 2012), ocasionando assim o fenômeno da ventilação.

Esta pode ser definida como um procedimento natural ou mecânico de abastecimento e retirada de ar em locais fechados, podendo controlar a pureza do ar interior (CHIARELLO, 2006). O vento pode ser capaz de influenciar termicamente o ambiente, variando a umidade e temperatura, a higiene, reduzindo os índices de gases, odores e renovação de oxigênio, acarretando na resposta fisiológica de animais confinados (CHRISTMANN et al., 2015).

Em edificações, a ventilação é uma ferramenta bastante utilizada, seja para dimensionar as forças atuantes em partes de suas estruturas, seja para proporcionar maior sensação de conforto térmico aos habitantes (GRAÇA e LINDEM, 2016). A Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT) através da Norma Brasileira (NBR) 6123 de 1988 é quem determina as forças devidas ao vento em edificações e classifica os terrenos em que aquelas podem atuar, através de três fatores: topográfico, de rugosidade e o estatístico (ABNT, 1988).

O fator topográfico analisa, de acordo com os tipos de terrenos, a influência topográfica local na variação da velocidade do vento, dividindo-os em taludes e morros. Já o fator de rugosidade, leva em consideração os efeitos combinados da rugosidade do terreno, da velocidade do vento e da dimensão da edificação, sendo subdividido em cinco categorias e três classes. Por fim, o fator estatístico considera o grau de segurança necessário em função da finalidade da edificação (ABNT, 1988).

A norma citada acima também faz referência a outras terminologias utilizadas quando se analisa o comportamento dos ventos em edificações. Nela, o vento é responsável por um escoamento de ar que divide o prédio em região de barlavento, pressão positiva, na qual a ventilação é soprada em relação à edificação; e sotavento, pressão negativa, lado oposto à direção de sopro do vento (CHIARELLO, 2006).

A Mecânica dos Fluidos é a ciência que estuda o comportamento de líquidos e gases, tanto em movimento, quanto em equilíbrio. Sua importância se dá pelo conhecimento da aplicação dos princípios que as envolve em qualquer meio de transporte, como por exemplo, aviões, carros, compressores e turbinas (POTTER et al., 2014) e até mesmo quando se deseja analisar o comportamento das ações eólicas em componentes mecânicos e/ou civis, aerogeradores, casas, construções rurais.

Quando se fala em construções rurais, pensa-se na ventilação como o principal meio de se obter conforto local, justamente pelo baixo custo de implantação e manutenção. Na zona rural, a ventilação natural é uma alternativa bastante viável, pois, devido à ausência de obstáculos, a geração de vórtices, escoamento giratório que funciona similar ao atrito, é bastante reduzida (POTTER et al., 2014), justificando-se assim a importância do presente estudo.

3.2. VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES.

A ventilação natural é um processo em que ocorre a renovação do ar (convecção natural) em um ambiente fechado sem a utilização de aparelhos mecânicos (SACHT et al., 2016). Em edificações, tal processo ocorre em uma ou mais aberturas no envelope do prédio, podendo ocorrer de duas formas: a) pela ação dos ventos - ventilação dinâmica e b) pela diferença de temperatura - ventilação térmica (GRAÇA e LINDEM, 2016; BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2015).

3.2.1. VENTILAÇÃO NATURAL POR AÇÃO DOS VENTOS

Nessa forma de ventilação, a ação dos ventos causa uma diferença de pressão, provocando um escalonamento das pressões, pressões positivas e pressões negativas no sentido horizontal.

Este tipo de circulação de ar é intensificado por meio de aberturas dispostas convenientemente em paredes opostas e no sentido dos ventos predominantes (CHIARELLO, 2006; CHRISTMANN et al., 2015; ELSHAFEI et al., 2017). As aberturas

de vãos criam paredes sujeitas a entradas de ar (pressão positiva) e paredes sujeitas a saídas de ar (pressão negativa), onde ao diferenciar tais pressões, correntes de ar satisfatórias sejam formadas, provocando assim uma ventilação natural (GRAÇA e LINDEM, 2016).

Em algumas regiões, onde a incidência de ventos é pequena, torna-se imprescindível a instalação de meios que reduzam a carga térmica devida à insolação e mantenham essa circulação contínua e eficiente (SACHT et al., 2016). Isso faz com que as diferenças de temperatura das massas de ar sejam outra alternativa para se obter a ventilação natural no interior de uma edificação.

3.2.2. VENTILAÇÃO NATURAL DEVIDO ÀS DIFERENÇAS DE TEMPERATURAS

A origem da ventilação terrestre está no topo da atmosfera (termosfera), por onde chega a radiação solar em uma quantidade chamada de “constante solar”, a qual rege o aquecimento da camada atmosférica. Em geral, quanto menor as distâncias cursadas pelos raios solares na atmosfera, maior será a abundância de radiação que alcança o solo terrestre, causando aquecimento diferenciado entre as regiões do globo terrestre (MAZON et al., 2006; BARBOSA et al., 2013; GRAÇA e LINDEM, 2016).

Esse aquecimento provoca correntes convectivas, porque a atmosfera tenta igualar as suas distintas áreas de pressão e temperatura (SACHT et al., 2016). Notam-se ainda movimentos originados pela presença das massas de água e terra e as distintas coberturas do solo (NEVES, 2012). Assim, sempre que há uma diferença de temperatura e pressão, origina-se o movimento natural do ar, causando um fenômeno denominado efeito chaminé (GRAÇA e LINDEN, 2016).

3.2.2.1. EFEITO CHAMINÉ

O efeito chaminé é definido como a variação de massa específica decorrente da ventilação natural (MORISHITA e SCHMID, 2007). Conforme visto no tópico anterior,

a ventilação natural pode ocorrer através da ação direta dos ventos, do efeito chaminé ou da combinação de ambos. Em áreas urbanizadas, a velocidade do vento é sensivelmente reduzida pelos obstáculos locais, tornando o efeito chaminé uma alternativa de projeto mais eficiente (CHRISTMANN et al., 2015).

Klein (2012) cita que o fenômeno de trocas de ar devido à pressão hidrostática - causada pelo gradiente vertical da massa específica do ar decorrente de diferenças de temperatura - é a transferência de calor por convecção natural, sendo positiva quando a edificação está pressurizada em relação ao exterior, causando a exaustão do ar interno.

Assim, pode-se concluir que, caso não se leve em consideração outros efeitos extrínsecos, quando o ar do interior de uma edificação está mais quente que o externo, a edificação está sujeita a uma subpressão na base e uma pressão no topo, em outras palavras, a pressão na cobertura é maior que na base (LUKIANCHUKI et al, 2014). A partir do que foi citado, pode-se calcular a diferença de pressão gerada por este fenômeno, baseando-se na Equação 1 da American Society Of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE ,2011):

$$\Delta P_s = (\rho_{ext} - \rho_{int}) \cdot g \cdot (H_{npl}) = \rho_o \frac{(T_e - T_i)}{T_i} \cdot g (H_{npl} - H) \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

ΔP_s é a diferença de pressão gerada pelo efeito chaminé;

T_i é a temperatura interna, em Kelvin;

T_e é a temperatura externa, em Kelvin;

ρ_o é a massa específica do ar padrão [1,225 kg/m³];

$\rho_{ext} - \rho_{int}$ é a diferença de massa específica do ar interno e externo [kg/m³];

H_{npl} é a altura do nível de pressão neutra, ou seja, altura do centroide das aberturas [m];

H é a altura da edificação [m];

g é a constante gravitacional [9,81 m/s²].

Considerando a ventilação da cobertura, as trocas de ar predominantes são as convectivas e, nesse caso, o dimensionamento correto das aberturas de entrada e

saída de ar, a geometria, e a temperatura irão influenciar na eficácia do sistema (KLEIN, 2012). Assim, quanto maior a diferença entre as alturas das aberturas e a diferença térmica entre o ambiente interno e externo, maior eficiência terá o efeito chaminé.

Ainda a respeito das aberturas em edificações, caso o ar interno esteja mais aquecido que o externo, o vento sairá pelas aberturas altas, enquanto que o ar externo, com temperatura inferior, entrará pelas aberturas baixas (OLIVEIRA *et al.*, 2014). Nessa situação, observa-se que o fluxo de ar será tanto mais intenso quanto mais baixas forem as aberturas de entrada e quanto mais altas forem as de saída do ar, ocasionando um processo similar ao da chaminé, explicando assim sua denominação.

Numa abordagem utilizada para estimar a taxa de fluxo de ar, Neves e Roriz (2012) afirmam que o efeito chaminé não depende dos ventos, em áreas urbanizadas. Esses autores realizaram um estudo com chaminé solar afim de quantificar a influência da velocidade do vento, da diferença de temperatura e das turbulências locais sobre a velocidade do fluxo de ar através das aberturas.

A velocidade local do vento e o coeficiente de descarga da abertura são termos necessários para o cálculo da taxa do fluxo de ar. Para a estimativa da perda de calor por convecção natural aplica-se a Equação 2 (BAËTA e SOUZA, 2010):

$$Q_c = C_d \cdot A_{ef} \cdot h \cdot (T_i - T_e) \quad \text{Equação 2}$$

Na qual temos:

Q_c é a taxa de fluxo de ar ocasionado por convecção [m^3/s];

C_d é o coeficiente de descarga;

A_{ef} é a área efetiva de aberturas de entrada e saída do ar (m^2);

h é a diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar, medida a partir do ponto médio de cada abertura (m);

T_i é a temperatura do ambiente interno ($^{\circ}\text{C}$);

T_e é a temperatura do ambiente externo ($^{\circ}\text{C}$).

Neste sentido, as coberturas ventiladas são uma excelente forma para se obter a convecção natural, e assim, promover o efeito chaminé, reduzindo a carga térmica da edificação.

A literatura apresenta o Coeficiente de Descarga como uma resistência ao escoamento do fluxo de ar, mudando conforme o tipo de abertura e o aumento do atrito (BAËTA E SOUZA, 2010), para alguns modelos de aberturas inferiores, conforme visto na Tabela 1:

Tabela 1: Coeficiente de descarga para diferentes tipos de aberturas. Fonte: Bittencourt e Cândido (2015)

Tipo de Abertura	CD
Veneziana com 50% de área livre	0,40
Basculante com chapas a 60°	0,58
Abertura com bordas vivas	0,62
Abertura com bordas arredondadas	0,85

Alguns estudos adotam o uso do efeito chaminé em edificações como uma estratégia útil para a manutenção da qualidade do ar em países de clima frio e/ou em ambientes de baixa ocupação e permanência, pois em climas quentes geralmente a temperatura interna é inferior à externa (GRAÇA e LINDEM, 2016; SACHT et al., 2016; MEISS et al., 2017). Para Meiss et al. (2017), considerando os fatores climáticos, o efeito chaminé é responsável, também, pela renovação do ar em edifícios não dotados de sistema de ventilação artificial.

3.3. VENTILAÇÃO E QUALIDADE DO AR INTERIOR.

No que diz respeito à qualidade do ar interno (QAI), a maioria das pesquisas científicas consideram, na avaliação do ambiente, as condições aceitáveis por seres humanos ou condições adequadas para o armazenamento de produtos de origem animal, com áreas climatizadas por algum componente mecânico, seja um resfriador evaporativo, ou condicionadores de ar, ventiladores, entre outros.

A NBR 16401/3, por exemplo, define o ar interior de qualidade aceitável como aquele isento de componentes orgânicos voláteis em concentração prejudicial à saúde

e percebido como satisfatório em pelo menos 80% dos componentes do recinto (ABNT, NBR 16401-3, 2008). Componentes orgânicos voláteis são componentes químicos que podem evaporar de substâncias como colas, produtos de limpeza e que, em altas concentrações, podem provocar danos à saúde, como dores de cabeça e/ou de garganta, náuseas etc. (DE FIGUEIREDO, 2007).

Em edifícios, tem ocorrido o aumento da densidade populacional e, conseqüentemente, a reclamação quanto à QAI tem crescido no mesmo ritmo. Tal fato é explicado pelo grande número de produtos sintéticos existentes no ambiente interior (Agência Portuguesa do Ambiente, 2009).

No Brasil, Cavalcanti et al. (2015) cita que a discussão a respeito desse tema se intensificou em 1998, após a morte do ministro Sérgio Motta, fazendo com que medidas fossem tomadas para qualificar o ar em um estabelecimento fechado. Em 2003, através da resolução RE 09/2003, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) passou a fiscalizar estabelecimentos públicos e fechados, obrigando que ambientes climatizados com carga térmica acima de 5 TR (60 mil BTU/h ou 17,6 kW) passassem por um Plano de Manutenção, Operação e Controle (PMOC), estimando uma taxa de ventilação e renovação de ar (BRASIL, 2003).

A Agência Portuguesa do Ambiente (2009) cita ainda que a QAI de um edifício pode ser determinado através de variáveis como localização, clima, forma de ventilação utilizada, número de ocupantes e fontes contaminadoras (temperatura, umidade, ventilação inadequada).

Estudos comprovam que existem algumas taxas de ventilação para o controle de poluentes e que, para que ocorra tal controle, a ventilação natural deve ser superior a 2 trocas/hora, impedindo assim o crescimento de fungos. Isso por que a ventilação natural dificulta o desenvolvimento de mofo, bem como reduz a concentração de gases nocivos e dos compostos orgânicos voláteis, desempenhando um papel na saúde e no bem-estar humano (CUNHA, 2010, DE FIGUEIREDO, 2007).

Outros estudos, como o de Mendell et al. (1996), afirmam que edifícios naturalmente ventilados impedem a sonolência e aumentam a produtividade dos seres humanos, fato esse bastante almejado em edifícios empresariais, contribuindo para evitar o “choque térmico” e, por consequência, a incidência de rinite alérgica (DE FIGUEIREDO, 2007).

Quando se fala em armazenamento de produtos agrícolas, o manual para a preparação e venda de frutas e legumes da *Food and Agriculture Organization* (FAO),

Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura, comenta que a ventilação é utilizada para remover alguns gases acumulados, a exemplo do etileno, responsável direto pela maturação de frutos (FAO, 2003). Outro ponto importante, com respeito à QAI, é que a ventilação é capaz de eliminar odores e vapores de fumos nocivos.

De acordo com a FAO (2012), um bom sistema de ventilação deve eliminar qualquer tipo de poeira ou condensação em áreas que possam contaminar produtos, materiais ou equipamentos de embalagens, mantendo-se a taxa de renovação de ar. Ainda no âmbito da pós-colheita e da armazenagem de produtos, a FAO (2014) afirma que a ventilação é essencial para afastar a infestação de insetos, roedores e outros seres indesejados.

Quando se fala em *Packing Houses*, as aberturas em telhados facilitam a saída do ar quente, proporcionando o efeito chaminé, conferindo níveis adequados de trocas de ar para a armazenagem de produtos agrícolas. Para tal, é aconselhado que a cumeeira tenha, no mínimo, três metros de altura (FAO, 2012).

No Brasil, em 2016, saiu uma normativa da Diretoria de Vigilância Sanitária (DVS), que aborda esse tema em *food trucks*, recomendando-se que o sistema de ventilação garanta o conforto térmico e a renovação do ar nos ambientes, deixando-os livre de fungos, bactérias, e outros elementos danosos a saúde.

Outro tópico importante, diz respeito a sua capacidade de manter o conforto térmico. Bittencourt (1995) define que a ventilação é frequentemente apontada como uma alternativa bioclimática bastante eficiente para obter-se o conforto térmico. Além disso, para Lukiantchuki (2015), o alcance social dessa estratégia é indiscutível, pois reduz a sensação de calor em edifícios com temperatura interna maior que a externa, por meio da ventilação natural.

Fanger et al. (1988) asseguram que para promover um ambiente confortável é essencial um melhor entendimento das respostas do corpo humano ao movimento de ar, e, com base nisso, elaborar uma adequada distribuição da ventilação nos ambientes.

A ventilação natural é capaz de proporcionar a renovação do ar de um ambiente e a velocidade do ar sobre as pessoas é fundamental para o alcance do conforto térmico (LUKIANCHUKI, 2015).

3.4. ÁTICOS VENTILADOS

O ático é definido como um elemento superior da fachada situado acima da faixa horizontal que se destaca da parede, sendo considerado o último pavimento de uma edificação (MAZON et al., 2006). Em outras palavras, pode-se afirmar que o ático é o espaço acima do tirante da tesoura da cobertura e abaixo das telhas (YU E MOORE, 2014). Havendo a ventilação nessa cobertura, a edificação conterà uma solução técnica muito comum para a redução de carga térmica através das trocas convectivas na camada de ar entre as telhas e o forro, expelindo o ar quente (IFFA E TARIKU, 2015).

A ventilação na cobertura é capaz de evitar o envelhecimento precoce da madeira, prolongar a vida útil das telhas e ainda, sobretudo em climas quentes, eliminar a umidade e renovar o ar interno (YU E MOORE, 2014). Notando a importância desse elemento em edificações, a maioria dos códigos de construção internacional exigem a presença do ático, ventilado ou não (IFFA e TARIKU, 2015). Yu e Moore (2015) complementam afirmando que as principais razões para que se obtenha uma ventilação em áticos são: remoção de ar quente interno, redução da condensação do revestimento do telhado e das telhas, e redução das represas de gelo causadas quando o ar está acima de 0°C e a linha do telhado está abaixo da mesma temperatura. Vale salientar que ambos os estudos foram feitos em climas frios, EUA e Canadá.

Em climas quentes, a ventilação nas coberturas serve para expelir o ar quente, reduzindo assim a carga térmica da edificação (LSTIBUREK, 2006). Alguns estudos correlacionam a ventilação em coberturas com o consumo energético da edificação, como, por exemplo, o de Yu e Moore (2015) e o de Iffa e Tariku (2017).

No primeiro estudo, os autores avaliaram a eficiência da chaminé solar acoplada ao ventilador mecânico (SPAVF - *Solar Powered Attic Ventilation Fans*) e descobriram que este tipo de sistema de ventilação tem um gasto energético menor que os “conectados” (com exaustores de tetos convencionais, que utilizam geralmente a energia elétrica), além de reduzir mais ainda a carga térmica (YU e MOORE, 2015). Ainda a respeito desta obra, os autores citam que o SPAVF, quando comparado aos exaustores de tetos convencionais, têm instalação mais rápida e eficiência de projeto em torno de 25 anos.

Já no segundo, os autores realizam estudos com cobertura ventilada em Lanternim, e afirmam que o ático ventilado com altas taxas de ventilação pode acarretar resultados inesperados. Se no verão, esta estratégia ajuda a remover o ar quente do espaço da cobertura, através do efeito chaminé, e a reduzir a carga térmica do local, durante o inverno, as altas taxas de ventilação minimizam o potencial de ganho solar, fazendo com que o ar frio incida pelas aberturas na cobertura e saia pelo Lanternim (IFFA e TARIKU, 2017).

Ambos os estudos levam em consideração aparelhos que realizam a função de exaurir o ar. Em contrapartida, quando se usa a ventilação natural em coberturas, o aporte financeiro para o consumo de energia é nulo, pois a velocidade do vento é a força motriz responsável pela renovação de ar (MEISS et al., 2017; YU e MOORE, 2015; WALKER E FOREST, 1995).

Lstiburek (2006) explica que a camada de ar do ático não deve se comunicar com os espaços condicionados da edificação, devendo os exaustores de ar do ático serem acoplados exteriormente. O autor baseia-se no estudo de Checket-Hanks, em 2003, realizado com áticos ventilados em climas quentes e úmidos, em Columbia, SC. Na oportunidade, concluiu-se que a condensação pode resultar em tubos suados. Assim sendo, conforme Yu e Moore (2015), a eficácia desses é atrelada à vedação entre as partes interiores, o que evita a pressão negativa e a entrada do ar, quer seja quente ou frio.

Apesar de citar todos esses estudos, pouco se discute sobre a eficiência da ventilação natural em coberturas. Estudos concluem que a maior limitação à ventilação natural é sua dependência de fatores climáticos, que, dependendo das circunstâncias, podem ocasionar espaços internos inadequadamente ventilados (MEISS et al., 2017; ELSHAFEI et al., 2017).

Baseado na afirmação anterior, ao analisar a norma brasileira NBR 15220/3, verifica-se que, para o clima quente e seco, as aberturas devem ser controladas (ventilação seletiva), evitando-se a ventilação no interior dos ambientes nos horários em que a temperatura do ar externo se encontre elevada, tal como ocorre na região de estudo desta dissertação (ABNT, NBR 15220-3, 2008).

A ventilação híbrida torna-se uma opção mais eficiente para uma diminuição significativa na utilização de energia por resfriamento artificial (ELSHAFEI et al., 2017). A cobertura é responsável pelo incremento da carga térmica da edificação, sendo que uso de laje ou forro associado à ventilação do ático poderá tornar a edificação mais

eficiente termicamente, e assim minimizar o consumo de energia para arrefecimento dos ambientes. (JUNIOR et al., 2009; CRAVO et al. 2015)

O tipo de telha, a cor, a inclinação do telhado, a presença de forro e a espessura da camada de ar são fatores que alteram o isolamento das coberturas em relação ao ambiente externo (CARNEIRO et al., 2015). Apesar disso, os materiais construtivos empregados nas coberturas de instalações agrícolas são, em geral, leves e pouco isolantes, o que compromete o desempenho térmico dessas edificações (YANG et al., 2011).

As ventilações das coberturas podem ser obtidas pela instalação de diversos elementos construtivos, conforme pôde ser visualizado na Figura 1. Nesta dissertação, as coberturas ventiladas estudadas serão o Lanternim, o *Shed* e o Arco Independente, todos com a presença ou ausência do forro.

3.5. MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DA VENTILAÇÃO EM EDIFICAÇÕES

Atualmente existe vários métodos para se estimar a velocidade do vento e a carga térmica em edificações em edificações, como por exemplo a análise computacional fluidodinâmica, simulação energética, ensaios de modelos reduzidos em túnel de vento e/ou ensaios com simulações reais.

Para esta dissertação, os métodos de simulações utilizados são o ensaio em túnel de vento e a simulação energética.

3.5.1. TÚNEL DE VENTO

O túnel de vento é uma máquina capaz de analisar o escoamento em edificações por meio da análise de modelo tridimensional em escala posicionado na sessão de teste e medições anemométricas, de pressão e de temperatura. Estes ensaios podem ser utilizados para auxiliar na identificação de possíveis interferências da direção e intensidade dos ventos incidentes sobre as coberturas ventiladas, contribuindo para a

determinação das perdas de carga por ação do atrito, representadas pelo coeficiente de descarga (NEVES e RORIZ, 2012; NGUYEN, 2014).

Os túneis de vento podem ser classificados de acordo em seu circuito em dois tipos: a) Túnel de Circuito Aberto (TCA), onde as duas extremidades estão ligadas a atmosfera, possuindo um baixo custo de construção e a inexistência do reaproveitamento do ar em ensaios oriundos de ventilação e b) Túneis de Circuito fechado (TCF), que possui um reaproveitamento de ar, um ruído menor e, conseqüentemente, uma menor energia requerida para seu funcionamento (MARTINS et al., 2013).

Alguns acessórios podem auxiliar a obter uma análise mais criteriosa, acarretando uma maior segurança na sua implementação e na análise dos dados. O *Honeycomb* e a tela, por exemplo, são utensílios que auxiliam a cessar a velocidade tangencial do fluxo de ar interno ao túnel de vento, reduzindo também o nível de turbulência do ar durante os ensaios e, assim, aumentando a uniformidade dos fluxos de ar. (NGUYEN, 2014; MARTINS et al., 2013).

Junior et al. (2012) afirmam que, a ineficiência da simulação em CFD em alguns tipos de escoamentos é capaz de explicar a utilidade de um túnel de vento. Para exemplificar tal utilidade, Loredo-Souza et al. (2010) realizou um estudo para determinar os coeficientes aerodinâmicos devido as ações do vento em uma cobertura do estádio de futebol, em Brasília, por meio de ensaios em túnel de vento. Monqueiro e Moraes (2012) justifica que a simulação em túnel de vento é capaz de determinar as cargas e interações aerodinâmicas, além de analisar os requisitos do projeto.

Os ensaios em túnel de vento podem ser utilizados para indicar possíveis interferências da direção e intensidade dos ventos incidentes sobre as coberturas ventiladas. Estes ensaios podem contribuir para a determinação das perdas de carga por ação do atrito, representadas pelo coeficiente de descarga (NEVES, 2012).

Estes ensaios permitem analisar a transformação urbana e/ou arquitetônica no tecido urbano, quantificando e qualificando o efeito dos ventos decorrentes de modificações espaciais (UZUELLI et al., 2009). Na agricultura, pode-se realizar análises em túnel de vento para avaliar a paisagem e suas barreiras naturais, já que estas podem alterar a característica do vento, elevando a turbulência e assim alterar a qualidade do fruto (MARTINS et al. 2013).

Um outro estudo avaliando a qualidade do fruto, foi o realizado por Cataldo et al. (2013). Neste estudo, os autores realizaram ensaios em túneis de vento com modelos

distorcidos de laranjeiras, e obtendo como resultado que a ação dos ventos incidentes nas folhas acarretaria ranhuras e uma péssima qualidade da fruta.

Junior et al. (2013) declaram que os testes em túnel de vento também auxiliam na determinação dos coeficientes de pressão da envoltória, que são importantes dados de entrada para o cálculo do fluxo de ar provocado pelo efeito chaminé associado à ação dos ventos. Para tal, os instrumentos devem estar em perfeito estado de conservação, calibração e certificação, podendo assim, estimar e assegurar o conforto de pedestres e análise estrutural do edifício (JUNIOR et al., 2012; UZUELLI et al., 2009)

Para Martins et al. (2013), o túnel de vento é uma ferramenta importante à disposição de uma economia sustentável, na medida em que os ensaios podem testar uma diversidade de tecnologias ou projetos a fim de torná-los mais eficientes.

Como exemplo, podemos citar o uso da ventilação natural em detrimento dos aparelhos de refrigeração mecânica, que faz parte do escopo da presente dissertação.

3.5.2. ENERGYPLUS™

O *EnergyPlus*™ é um programa de simulação termoenergética de edifícios, desenvolvido em 1996 por um grupo de pesquisadores do Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Construção do Exército dos Estados Unidos (CERL), na Universidade de Illinois (UI), do Laboratório Nacional Lawrence Berkeley (LBNL), da Universidade do Estado de Oklahoma (OSU), *Analytics* GARD e do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE). O modelo foi desenvolvido a partir de dois outros programas, o BLAST (*Building Loads Analysis And System Thermodynamics*) e o DOE-2 (*Department of Energy-2*), utilizados para modelar o consumo de energia (aquecimento, resfriamento, ventilação, iluminação e outras cargas elétricas), baseando-se em um console que lê entrada de dados e grava a saída em arquivos de texto (ENERGY PLUS™, 2017; WALLAUER, 2003; MELO ET AL., 2009).

O programa utiliza alguns comandos, o IDF-Editor, para criar arquivos de entrada através de uma interface simples em uma planilha eletrônica; o EP-Launch, que gerencia arquivos de entrada, saída e a execução das simulações em lote; e, por fim, o EP-Compare, responsável pela análise gráfica dos resultados das simulações.

Quando comparado aos softwares CFD (Dinâmica Fluido Computacional, em inglês), o *EnergyPlus*TM é mais eficiente, pois o primeiro limita-se a realizar simulações em um curto espaço de tempo, enquanto o segundo tem um tempo de processamento mais rápido e é capaz abranger uma simulação de um ano completo (ENERGY PLUS, 2017; MELO et al., 2009, BARBOSA et al. 2013).

Estes programas que estimavam a carga térmica começaram a surgir a partir da crise energética de 1970, quando se necessitou reduzir o consumo de energia em edificações (ALCALDE, 2010). Nestes softwares, o consumo de energia e as trocas térmicas são simuladas a partir do efeito da radiação e da convecção em ambientes internos, levando em conta o tempo da simulação, utilizando três componentes básicos que compõem o bloco principal do aplicativo: Um gerenciador de simulação, um módulo de simulação do balanço de calor e massa e um módulo de simulação dos sistemas da edificação (BARBOSA et al., 2013; CROWLEY et al., 2002).

Arquitetos e engenheiros são os que mais utilizam o *Energyplus*TM, pois sua interface e seus cálculos auxiliam no dimensionamento de condicionadores de ar e instalações elétricas, dentre outros. Algumas variáveis são inseridas de um banco de dados com informações climáticas do local, enquanto que as outras, como a descrição arquitetônica e construtiva do edifício, a potência da instalação, as cargas dos equipamentos, entre outros, são inseridas manualmente pelo projetista (BARBOSA et al., 2013).

Este dimensionamento é realizado através de uma simulação integrada, em que, os cálculos de carga térmica, a produção de energia térmica e o tratamento do ar ocorrem concomitantemente, conforme indicado na Figura 2

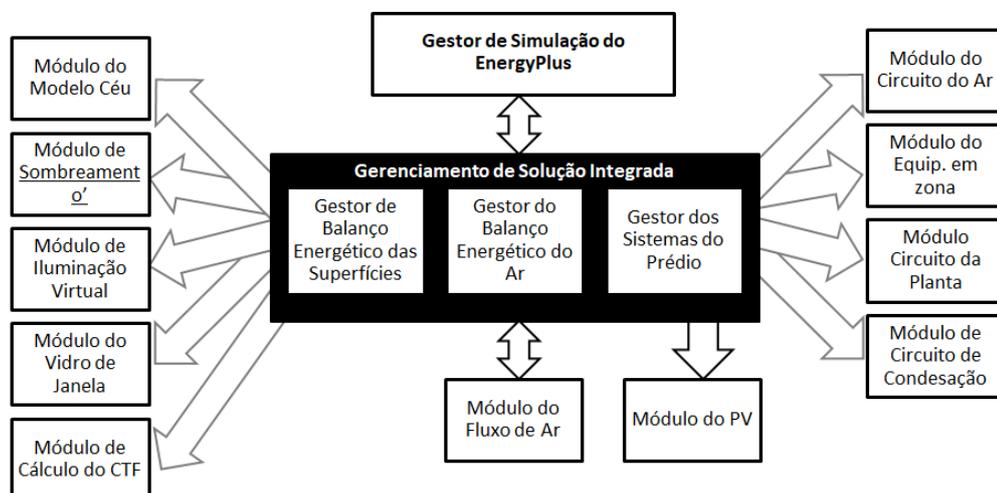


Figura 2: Esquema de solução integrada. FONTE: adaptado de *EnergyPlus*TM (2013).

A simulação ocorre através dos gestores ilustrados acima (Figura 2). O primeiro gestor, o de balanço de energia das superfícies, é onde se realizam as trocas de energia e massa em cada superfície, devendo-se levar em consideração a transferência de calor (condução, convecção, radiação) e a transferência de massa. O segundo, o de balanço de energia do ar, trabalha com as correntes de ar envolvidas, levando em conta a carga térmica do ar em cada espaço, quantificando os ganhos térmicos por convecção. Por fim, após o balanço de energia estar concluído para um intervalo de tempo escolhido pelo usuário, a informação é recolhida e transmitida ao gestor de simulação dos sistemas do edifício, que controla a simulação do sistema de ar condicionado e os sistemas elétricos (CARTAS, 2011).

De acordo com o DOE (2016), o *EnergyPlus™* foi projetado para ser um elemento dentro de um sistema de programas que incluiria uma interface do usuário para descrever o funcionamento do edifício. Dentre estes, pode-se citar o *OpenStudio®*, através da ferramenta de modelagem *OpenStudio SketchUp Plug-in (freeway software livre)*, que suporta a modelagem de energia de edifícios inteiros usando o *EnergyPlus™* e a análise avançada da luz do dia através da *radiação*. (OPENSTUDIO, 2016).

Após a modelagem 3D, é preciso determinar os arquivos climáticos, que, de acordo com Wallauer (2003), podem ser do tipo IWEC (*International Weather for Energy Calculations*), obtidos através de pesquisas realizadas pela ASHRAE, em 227 sítios exteriores aos EUA e ao Canadá, baseando-se nas escolhas da temperatura de bulbo seco a partir dos períodos mais quentes e mais frios de uma localidade. Para Alcalde (2010), esta inserção pode ser feita manualmente, através do *EP-Launch*, plataforma do próprio *EnergyPlus™*, na seção *IDF Text Editor*.

No Brasil, os arquivos climáticos se baseiam nas séries históricas de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com uma base de dados de pouco mais de 400 municípios distribuídas no território nacional (INMET,2017). Na ausência de dados para uma localidade, estes podem ser determinados, como por exemplo, o método do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), tal como foi feito na presente pesquisa.

4. METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, adotou-se duas etapas metodológicas:

1ª) ensaio de modelos reduzidos em túnel de vento, para analisar o comportamento da ventilação nas coberturas, com e sem a presença do forro;

2ª) simulação da carga térmica no *EnergyPlus*TM.

Estas etapas são detalhadas a seguir.

4.1. ENSAIOS DE MODELOS REDUZIDOS EM TÚNEL DE VENTO

4.1.1. TÚNEL DE VENTO DO LACAF

Os ensaios em túnel de vento permitiram uma análise mais precisa da influência do vento sobre o desempenho das aberturas em galpões agrícolas com áticos ventilados.

Os testes foram realizados no túnel de vento do Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada (LaCAF) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Este é um túnel de circuito aberto, que, de acordo com Nguyen (2014), é o mais indicado estudar fluxos de ar em torno de modelos de construção escalados, pois o fluxo de ar tem mais espaço para mover o modelo.

Possui um comprimento total de 9,03 m, onde, 4,80 m são para a seção de teste. A área de seção transversal de 0,72 m² (0,90 m de largura x 0,80 m de altura), com um regulador na parte superior, que distribuem igualmente a pressão estática durante o teste. A Figura 3 ilustra o túnel em que foi realizado o ensaio (MATSUMOTO et al., 2011; GALTER et al., 2015).

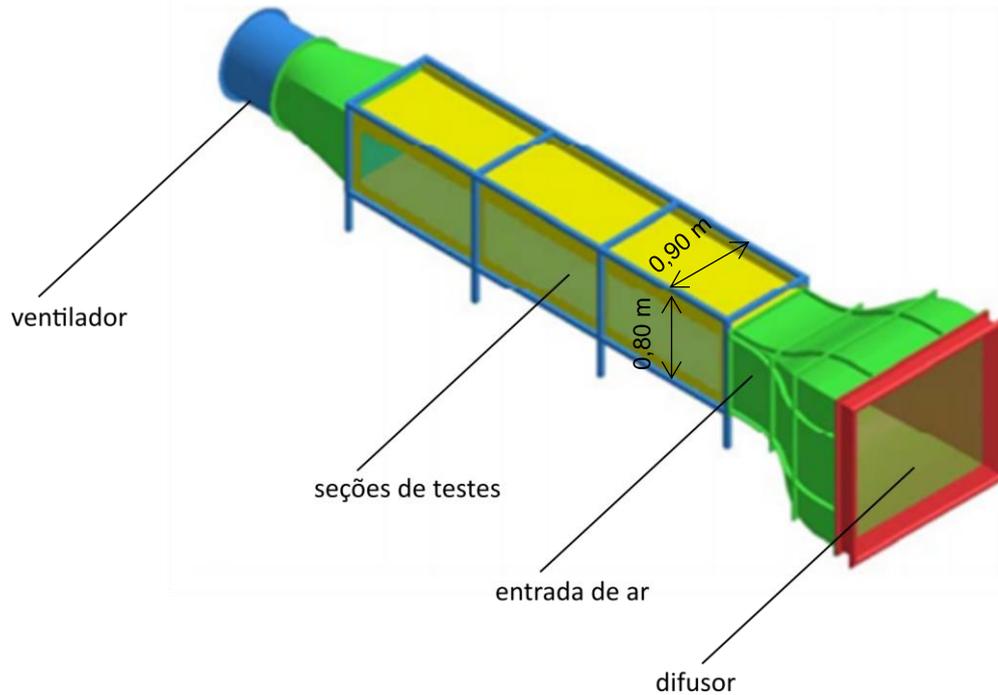


Figura 3: Ilustração geral do túnel de vento do LaCAF. Fonte: Galter et al (2015).

Ainda sobre o túnel do LaCAF, possui um motor elétrico de 12,5 HP, um ventilador axial que aspira o ar, numa velocidade máxima de 20 m/s a 850 RPM de frequência. Este ventilador é composto por 16 pás com um diâmetro de 1,20 m cada (Figura 4). Há ainda, um disco giratório com 0,6 m de diâmetro utilizado para fixar o modelo reduzido na seção de ensaio (GALTER et al., 2015; SACHT et al. 2016).



Figura 4: Vista interna do túnel de vento do LaCAF.

4.1.2. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

A calibração dos sensores ocorreu no próprio túnel de vento, em três posições, na Entrada, no ponto P1 e no ponto P2. Para tal, utilizou-se o anemômetro padrão (CTA 90P10), um termopar (T29) e três anemômetros de fio quente (90P11), todos da Dantec Dynamics. A calibração dos anemômetros 90P11 ocorreu em função da frequência de rotação do ventilador no túnel. De acordo com o fabricante, esta forma de calibração estabelece uma equação polinomial entre a saída, o anemômetro CTA 90P10 e a velocidade, expondo o sensor a um conjunto de velocidades conhecidas, U , em m/s, e em seguida gravando as tensões elétrica, E , em volts.

A Figura 5 mostra a equação de calibração de cada sensor de velocidade durante os ensaios.

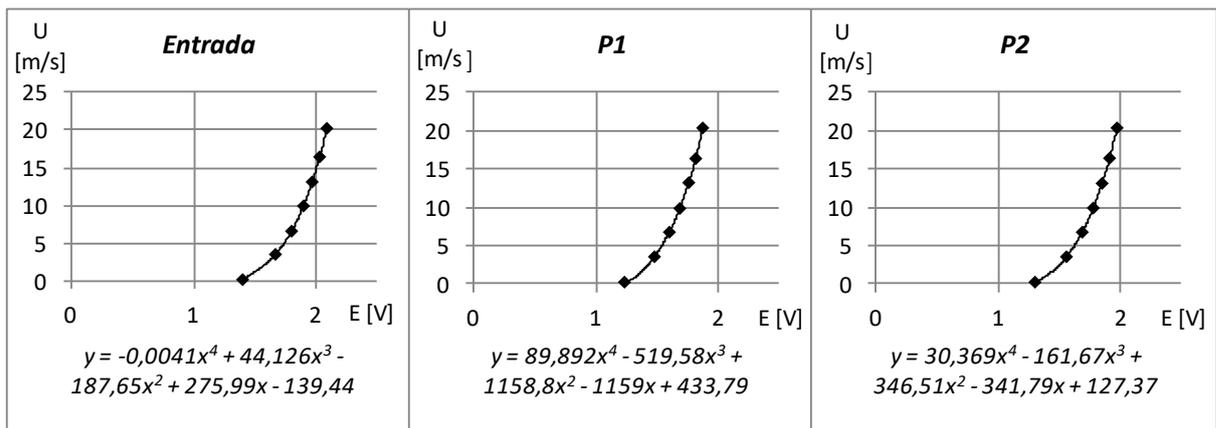


Figura 5: Equações polinomiais das velocidades calibradas em função da tensão.

A calibração dos sensores de velocidade ocorreu no próprio túnel, logo após ao bocal de entrada de ar. Conforme mencionado por Nguyen (2014), neste local, o fluxo de ar é mais uniforme, independente da rotação, justamente por estar próximo da tela, reduzindo assim a turbulência do ar. Um termopar também foi inserido no mesmo local para ajustar a velocidade do ar, com base na temperatura, conforme visto na Figura 6.

Segundo a fabricante, ao inserir o sensor de temperatura e ativar a função de correção baseada na temperatura, a confiabilidade dos dados chegam a 99%, aconselhando que o mesmo seja realizado durante todo o ensaio, exigindo que a temperatura e a tensão do fio quente do anemômetro sejam medidas simultaneamente.



Figura 6: Calibração dos anemômetros

Para a aquisição dos dados, posicionou-se os sensores em três pontos: a) Entrada, um termopar e um anemômetro; b) Posição P1, um anemômetro e c) posição P2, o último anemômetro (Figura 8). Os testes foram realizados no Shed a 0° (aberturas funcionando como captador de ar) e 180° (aberturas funcionando como extrator de ar), no Lanternim a 0° e no Arco Independente a 0° (Figura 8).

Estes dados foram gerados a uma frequência no túnel de 1000 Hz, com um loop de 2 segundos, totalizando 8000 amostras por rotação no ventilador. A frequência de rotação usada para calibrar os sensores de velocidade e ensaiar os modelos reduzidos foram, em RPM: 150,280,410,540,670,800, respectivamente. Já a temperatura, durante toda a simulação, variou entre $23,88^\circ\text{C}$ e $24,48^\circ\text{C}$, alcançando com uma média de $24,03^\circ\text{C}$.

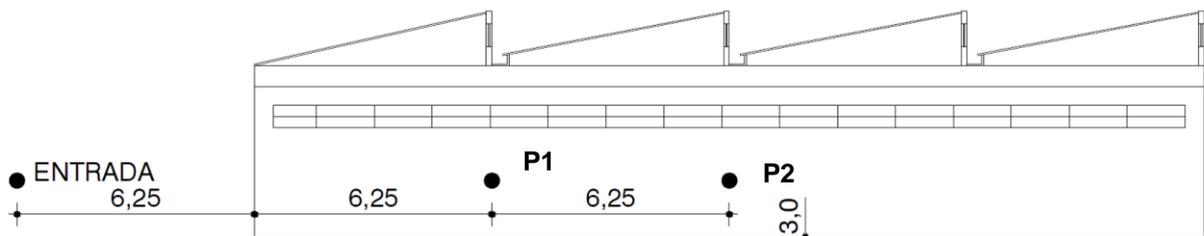


Figura 7: Distribuição dos sensores no modelo reduzido.

4.1.3. MODELOS REDUZIDOS

Os galpões simulados foram confeccionados em madeira do tipo compensado MDF (*Medium Density Fiberboard* - Painel de fibra de densidade média), na escala de 1:50, com o intuito de estudar a interação entre os galpões agrícolas e quatro tipos de coberturas ventiladas: *Shed*, a 0 graus, que funciona como captador de ar (Figura 8A); *Shed*, com norte a 180 graus, funcionando como extrator de ar (Figura 8B), Lanterna (Figura 8C) e o Arco independente (Figura 8D).

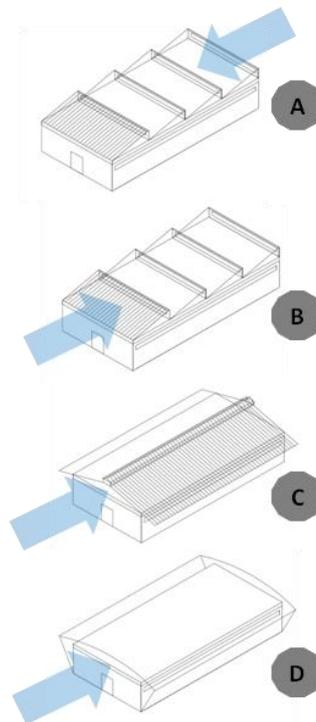


Figura 8: Galpões ensaiados no túnel de vento. a) cobertura em *Shed* como captador de vento b) cobertura em *Shed* como extrator de vento. c) Lanterna; d) Arco independente.

Suas dimensões foram tiradas baseado em um levantamento de Luz (2016), em que se analisava galpões agrícolas reais que utilizam a ventilação natural como estratégia de conforto térmico e os principais tipos de cobertura utilizados. Os valores obtidos, em média, foram 12 m de largura; 25 m de comprimento; 4 m de altura e 0,55 m de câmara de ar.

Para aumentar a incidência de vento interno a edificação, inseriu-se janelas, tanto nas laterais, funcionando como uma espécie de cobogós, como nos áticos, todas

com altura de 0,6 m e comprimento variando, 24 m nos galpões e na cobertura duas águas com Lanternim e 11 m no *Shed*. A Figura 9 elucida cada uma destas medidas.

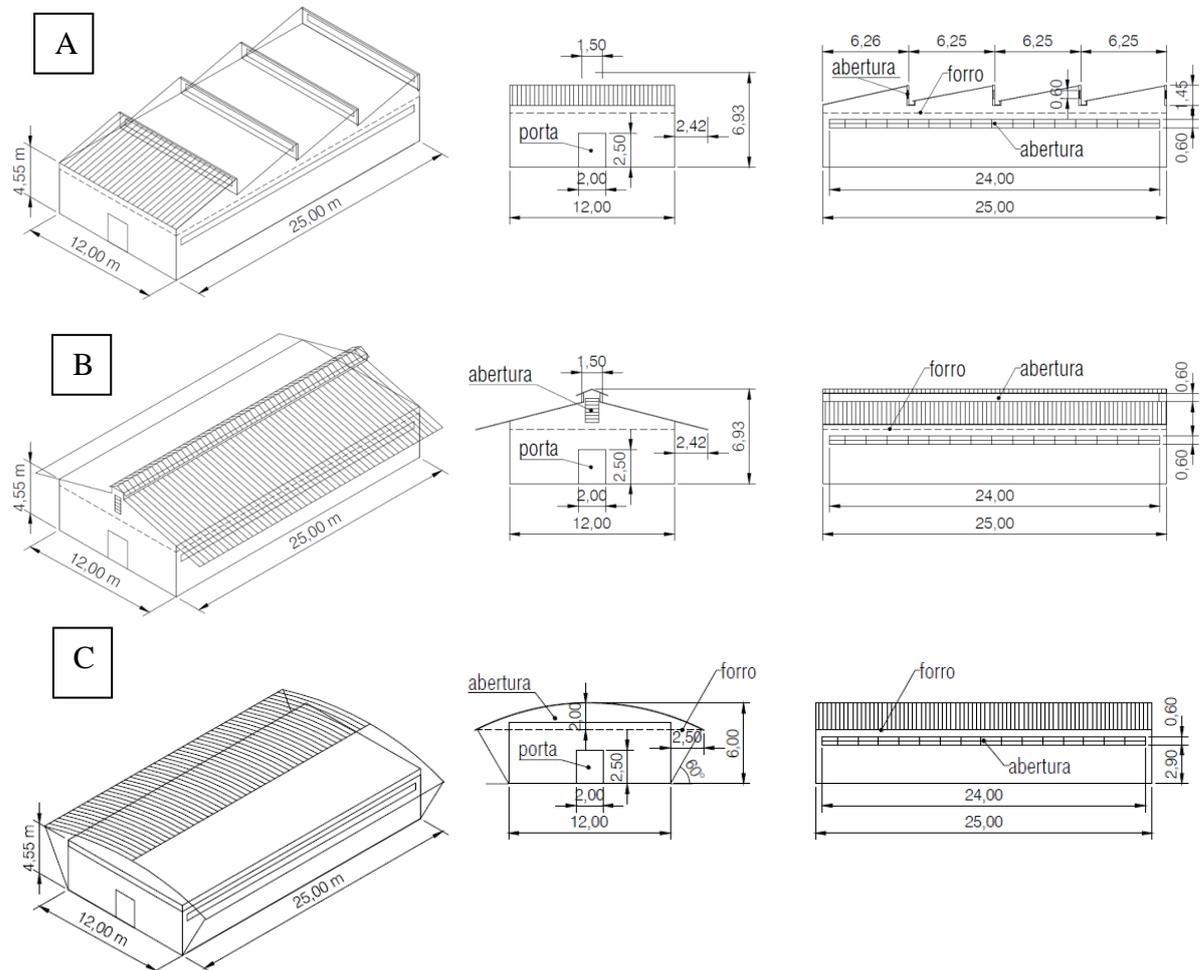


Figura 9: Medidas reais dos galpões agrícolas. A) *Shed*; B) Lanternim; C) Arco Independente.

Em seguida, inseriu-se cada modelo reduzido no túnel e testou-se uma a uma, cada tipo de cobertura. Os sensores de velocidades foram inseridos em três diferentes posições e a 3 cm de altura: a) a 6,25 cm da entrada do galpão, b) a 6,25 cm dentro do galpão e c) a 12,5 cm da porta, conforme pôde ser observado na Figura 7.

4.2. SIMULAÇÃO DA CARGA TÉRMICA NO *ENERGYPLUS*TM

O *EnergyPlus*TM tem um banco de dados com informações climáticas do local, utilizando, para o cálculo de carga térmica, as seguintes hipóteses: (a) a temperaturas de superfície é uniforme, (ambas as radiações, onda longa e de onda curta uniformes), (b) as superfícies trocam calor através da radiação, (c) ocorre a condução no interior do elemento e (d) a zona térmica contém uma temperatura uniforme. Quanto às demais variáveis, como (e) a descrição arquitetônica e construtiva do edifício, (f) a potência da instalação, (g) as cargas dos equipamentos, dentre outras, são inseridas manualmente pelo projetista (BARBOSA *et al.*, 2013; ENERGY PLUS, 2017).

Para realizar o dimensionamento da carga térmica, o software utiliza os extremos térmicos das normais climatológicas do local estudado e baseado nestes dados, no número de iterações, nas propriedades dos materiais inseridas, e em dados de resistência térmica estima a carga térmica da edificação simulada. (ENERGY PLUS, 2017).

Baseando-se no diagnóstico em *packing houses* de uvas nas regiões de Petrolina-PE e de Juazeiro-BA, levantado por Luz (2016), elaborou-se um projeto de galpão agrícola, de pequeno porte, com duas variações na arquitetura da cobertura - Lanternim e *Shed*, naturalmente ventiladas.

O projeto padrão foi modelado no *OpenStudio*[®] *SketchUp Plug-in*, extensão da ferramenta de modelagem *SketchUp* 3D da Trimble, que permite aos usuários criar rapidamente a geometria necessária para a simulação no *EnergyPlus*TM. A modelagem no *OpenStudio*[®] permite a inserção de zonas térmicas, definidas pela NBR 16401 - parte 1 como:

Um grupo de ambientes com mesmo regime de utilização e o mesmo perfil de carga térmica, permitindo que as condições requeridas possam ser mantidas com um único dispositivo de controle, ou atendidas por um único equipamento condicionador destinado somente àquela zona" (ABNT, 2008, p.4).

O modelo tridimensional e as variações na cobertura são apresentadas na Figura 10; as características dos materiais construtivos e fontes de calor inseridas como dados de entrada no *OpenStudio*[®] *SketchUp Plug-in* são apresentados na Quadro 1.

Suas dimensões são as seguintes: 12 m de largura; 25 m de comprimento; 4,55 m de altura, sendo que 0,55 m corresponde à câmara de ar do ático).

Para simular a ventilação natural interna a edificação, inseriu-se janelas, tanto nas laterais (cobogós), como nas coberturas ventiladas (áticos ventilados), todas com alturas de 0,6 m. Nas janelas laterais, o comprimento foi de 24 m, cada janela, enquanto que na cobertura, tal valor mudava de acordo com o ático. No *Shed*, o comprimento das janelas que simulavam o ático era de 11 m, cada, e no Lanternim, 24 m. Ainda a respeito do Lanternim, inseriu-se ainda uma janela frontal (Frontão) de 0,85 m de largura por 1,20 m de comprimento, conforme visto na Figura 10A.

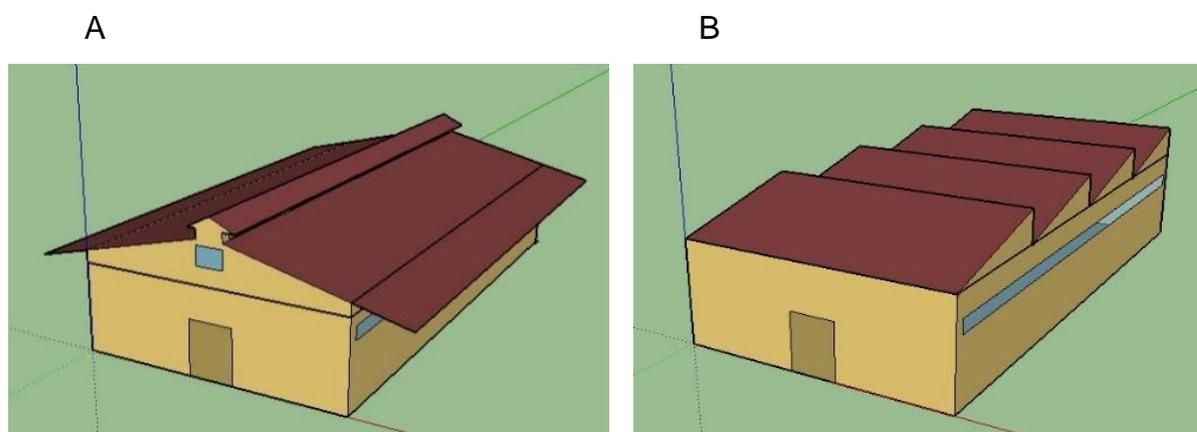
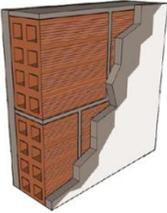


Figura 10: Modelo tridimensional de galpão agrícola de pequeno porte. A) Lanternim; b) *Shed*.

Quadro 1: Propriedades térmicas dos materiais de construção utilizados no OpenStudio® Sketchup plug-in. Fonte: ABNT (2005).

Componente	Material	Massa Específica (ρ) [kg/m ³]	Condutividade térmica (λ) [W/m.K]	Calor específico (c) [J/kg.K]	Espessura (mm)
	Tijolo Cerâmico Vazado	1800	1,15	0,92	90,0
	Argamassa Interna e externa	2000	1,15	1,00	25,0
 <p>Telha Termoacústica com Sanduíche de EPS TP 35</p>	Chapa trapezoidal em Aço interna e externa	7800	55,0	460	1,00
	Poliestireno expandido moldado	20,00	0,04	1,42	35,0
	Gesso	784,9	0,16	0,83	12,7

Para avaliar a eficiência das aberturas, simulou-se os modelos em diversas orientações solares e incidência do vento em relação à abertura no ático:

- *Shed* – realizando a função de extração de ar – Com as seguintes orientações da fachada em relação ao Norte a 0° (vento incidente a 84°), Norte 45° (vento incidente a 39°), Norte a 90° (vento incidente a 06°) e Norte 135° (vento incidente a 39°)
- *Shed* – realizando a função de captação de ar - Com as seguintes orientações da fachada em relação ao Norte a 0° (vento incidente a 84°), a 45° (vento incidente a 39°), a 90° (vento incidente a 06°) e a 135° (vento incidente a 39°)
- Lanternim - Com as seguintes orientações da fachada em relação ao Norte a 0° (vento incidente a 84°), a 45° (vento incidente a 39°), a 90° (vento incidente a 06°) e a 135° (vento incidente a 39°)

A Figura 11 a seguir ilustra cada uma destas condições.

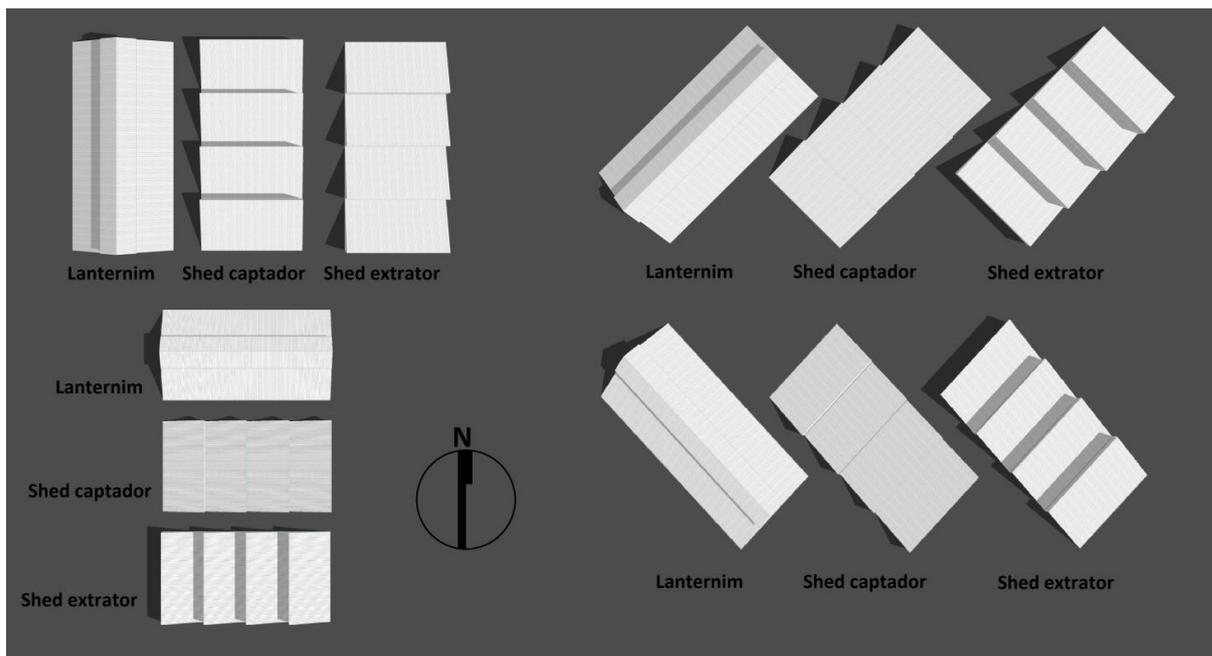


Figura 11: Sombreamentos nas coberturas em Lanternim e em Shed nas diferentes orientações solares.

Os modelos foram simulados para o clima de Petrolina-PE. O município se encontra a 370 m de altitude, latitude de $-9,39^\circ$ e longitude de $40,51^\circ$ (INMET, 2017). Essa região está influenciada pelo Clima Tropical Semiárido, seco e muito quente, do tipo BSh (classificação climática de Köppen), com máxima precipitação em março e mínima em agosto; apresentando balanço hídrico negativo, alta radiação solar, bem como elevados valores de insolação e de radiação solar global (ALVARES et al., 2014).

Já o arquivo climático, foi inserido através da metodologia adotada pelo do IPT, descrito a seguir. A partir dele, determinou-se o dia típico de verão, conforme sugerido por Siqueira et al. (2005) baseando-se numa série histórica dos dados climatológicos dos últimos dez anos obtidos pelo Laboratório de Meteorologia da Universidade Federal do Vale do São Francisco (LabMet).

Por fim, simulou-se os galpões em condições vazias, ou seja, sem aparelho elétrico e sem ocupantes, esta consideração foi utilizada para que se pudesse estimar a carga térmica devido a ventilação natural, e exclusivamente, o desempenho de cada tipo de cobertura.

4.2.1. DETERMINAÇÃO DO DIA TÍPICO DE VERÃO PELO MÉTODO DO IPT

Segundo Goulart (1993), o dia típico de projeto de verão é definido como um dia real numa determinada série histórica, caracterizado pelo valor horário da temperatura do ar, pela velocidade média predominante do vento ao longo desta série. Para a determinação deste dia típico, recomenda-se, uma fonte de dados de dez anos (AKUTSU, 1998).

Para tal, analisou-se os dados históricos da estação da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), localizando no campus de Ciências Agrárias (Latitude - 9,32° e Longitude 40,56°), em Petrolina-PE, compreendidos entre janeiro de 2008 a dezembro de 2017.

Para a determinação dos meses de verão, Siqueira et al (2005) afirma que, deve-se fazer um tratamento estatístico dos valores das médias, máximas e mínimas diárias dos parâmetros climáticos locais, obedecendo um seguinte algoritmo:

1ª Etapa: Determinou-se o mês mais quente do ano, utilizando-se as temperaturas máximas diárias para o período de verão. O período de verão é composto pelo mês mais quente e pelos meses que apresentarem, uma diferença de α °C, dado pela Equação 3 (SIQUEIRA et. al, 2005), para o mês mais quente, em média, dos anos analisados.

$$\alpha = 0,10 * (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

- $T_{m\acute{a}x}$ - É a média das temperaturas máximas diárias do mês mais quente, em °C;
- $T_{m\acute{i}n}$ - É a média das temperaturas mínimas diárias do mês mais quente, em °C.

Ao término da primeira etapa, constatou-se que os meses típico de verão estavam no intervalo de novembro a março, sendo novembro o mês típico de verão. A Figura 12 a seguir mostra que o maior valor obtido nesta série histórica foi em novembro de 2015, alcançando 36,35 °C e sendo assim o valor de $TBS_{m\acute{a}x}$.

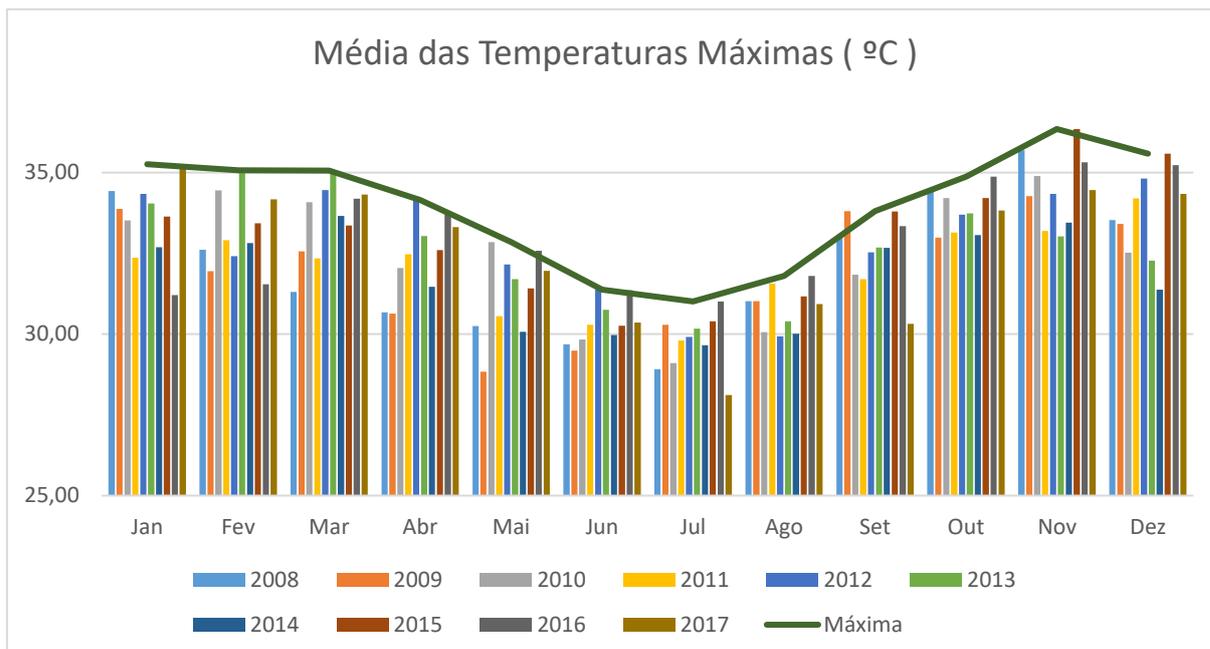


Figura 12: Gráfico da média das temperaturas máximas (°C) em função dos meses do ano.

Analisando a média das temperaturas mínimas, observou-se que seu maior valor era 23,17 °C, datado em Novembro de 2012. Assim, o valor de alfa resultou em 1,32° C.

b) 2ª Etapa: Determinando o mês típico, passou-se para a segunda etapa, responsável por determinar os possíveis anos típicos. Para tanto, subtrai-se o alfa da temperatura de bulbo seco máxima mais elevada da série histórica, indicando assim os possíveis anos típicos.

Selecionou-se todos anos em que a média das temperaturas máximas de Novembro estava entre 35 ° C ($TBS_{máx} - \alpha$) e 36,35° C ($TBS_{máx}$), restringindo-se aos anos de 2008, 2015 e 2016 (Figura 13).

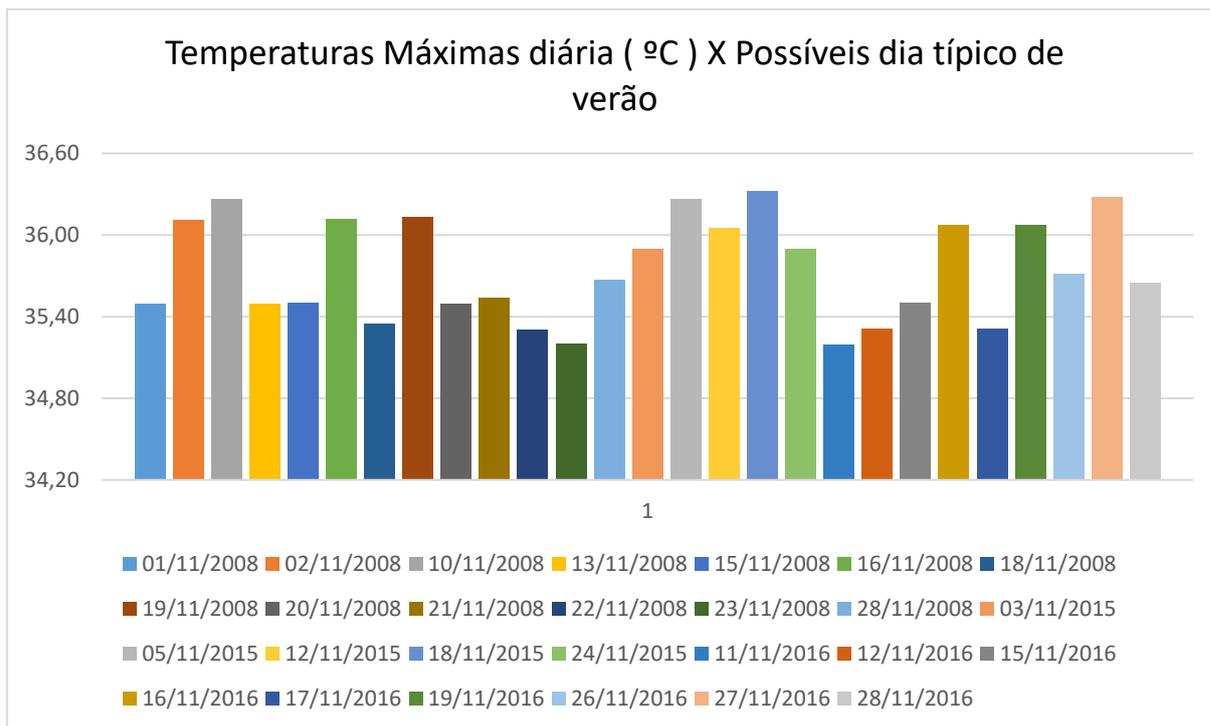


Figura 13: Determinação da temperatura típica de verão (°C).

Partindo agora para a terceira etapa, onde será determinada a temperatura típica de verão.

c) 3ª Etapa: Determinam-se os valores das temperaturas máximas diárias ($TBS_{máx}$) dos anos típicos. Tais valores são identificados por TV (temperatura de verão). Esses valores devem satisfazer o critério de que $TBS_{máx}$ é maior ou igual a TV . Adiante, extraem-se os dias com temperaturas dentro dos intervalos dados, pela Equação 4, conforme Siqueira et. al (2005).

$$TBS_{máx} = (TV) \pm 0,5 \quad \text{Equação 4}$$

Nesta etapa, obteve-se que a temperatura típica de verão seria 35,82 °C (TV), assim, a partir dos dias elucidados na Figura 12, eliminando-se todos os cuja temperatura máxima fosse menor que TV , restringiu-se a quantidade de dias típicos, conforme visto na Figura 13.

d) 4ª Etapa: Selecionaram-se as temperaturas máximas diárias (Figura 14) cujo o valor estava compreendido entre $TBS_{máx}$ e TV , calculando-se a média desses dados, obtendo-se o valor de 36,10 °C.

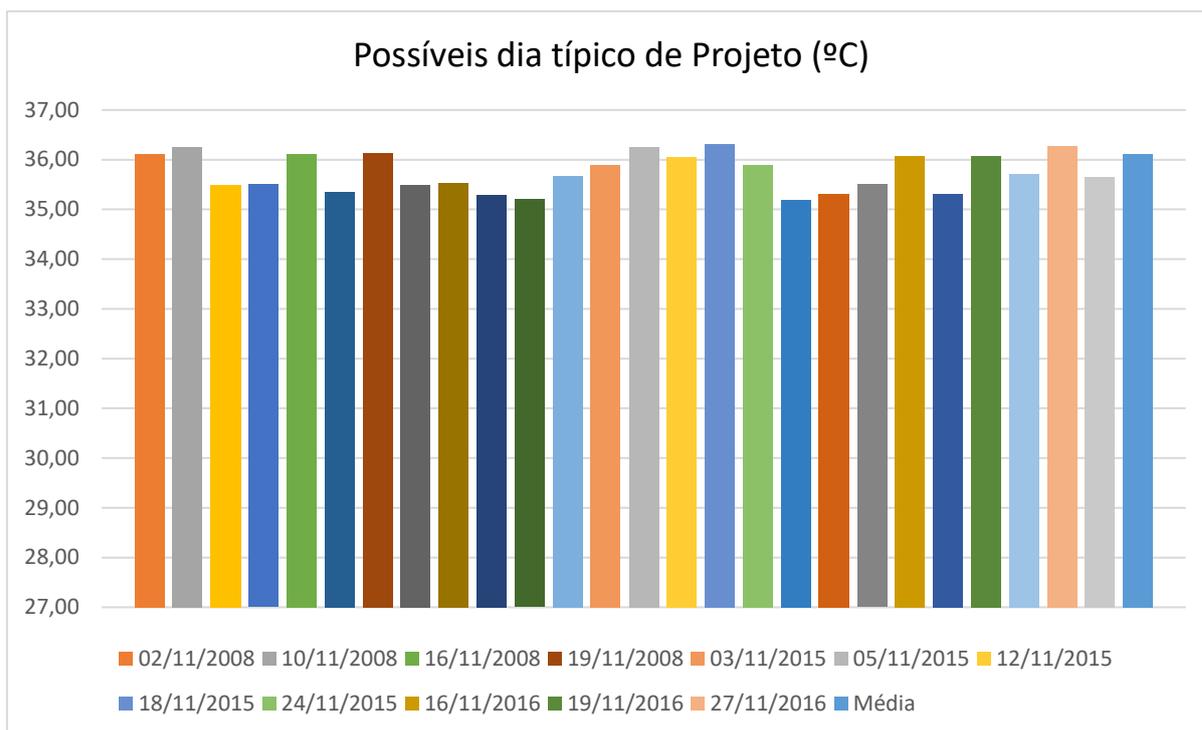


Figura 14: Possíveis dias típicos de projeto (°C)

e) 5ª Etapa: Para estes os dias listados dentro dos intervalos encontrados, calculou-se a média das seguintes variáveis climáticas: Velocidade dos Ventos (VV) e Direção do Vento Predominante (DV).

Compara-se a média diária à média geral, obtida na Etapa 5. O dia que apresentar os valores mais próximos da média, será o dia típico de projeto para o verão.

Os dias encontrados foram 02 e 16 de novembro de 2008. Descartou-se o dia 16, visto que em análise da radiação solar observou-se possível influência da nebulosidade, conforme visto Figura 15.

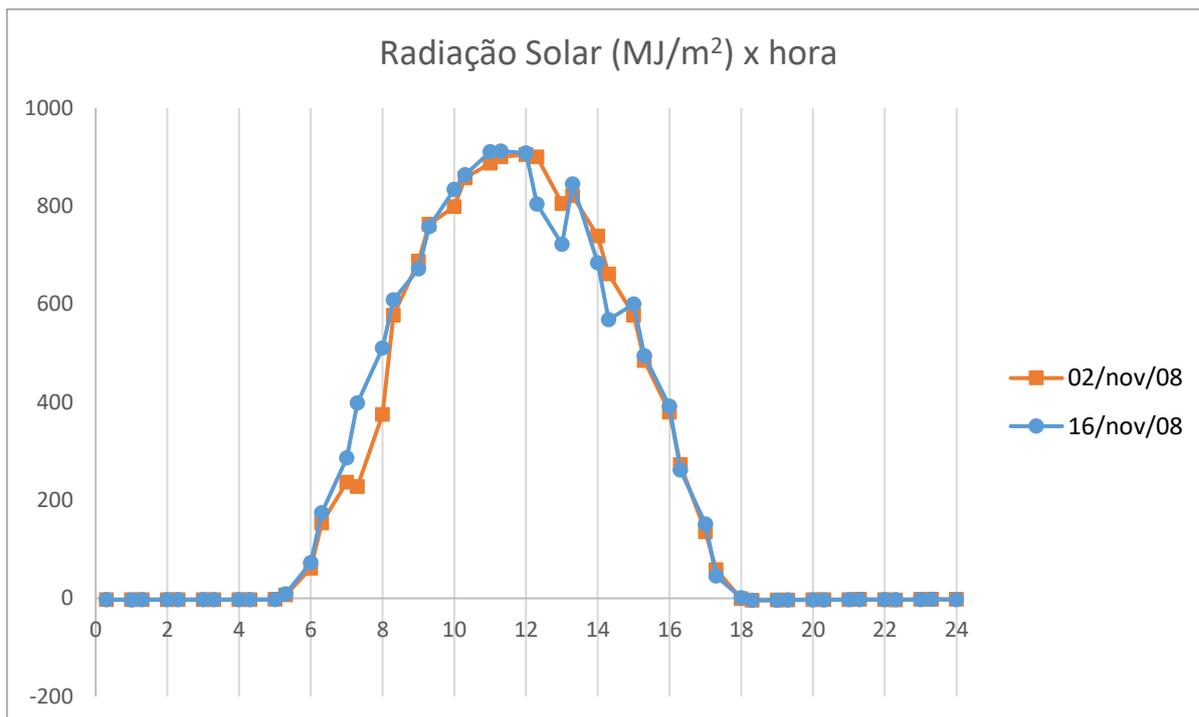


Figura 15: Radiação solar horária x hora

Portanto, através do método do IPT, o dia 02 de novembro de 2008 foi considerado o dia típico de verão e os dados inseridos para o cálculo da carga térmica no *EnergyPlus*TM foram:

- Temperatura de bulbo seco - 36,11 °C;
- Velocidade do ar - 4,37 m/s;
- Direção predominante dos ventos - 84°;
- Amplitude térmica diária - 13,2 °C.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ENSAIO EM TÚNEL DE VENTO

O ensaio de túnel de vento foi realizado para estudar e analisar o comportamento do fluxo de ar interno nas edificações testadas, variando a velocidade do vento em função da rotação do ventilador e, conseqüentemente, identificar a melhor cobertura ventilada visando o desempenho térmico para o clima Tropical Semiárido.

A Tabela 2 apresenta a razão das velocidades obtida no ponto P2 e na entrada do galpão e seus respectivos desvios padrões. No ensaio da maquete com a presença do forro, a velocidade do vento foi reduzida à medida que se afastava da porta de entrada, independentemente do valor de velocidade na entrada.

Tabela 2: Razão da velocidade nos diferentes tipos de galpões com forro.

Tipo de Cobertura	P2/Entrada
<i>Shed</i> 0 Graus	0,38 a
<i>Shed</i> 180 Graus	0,37 a
Lanternim	0,40 ab
Arco	0,45 b

Percebeu-se que os valores foram bastante próximos e que o tipo de cobertura pouco interferiu na taxa de velocidades. Este fato é explicado devido a divisão da edificação em zonas de ventilação, a região habitada e o ático, logo, não ocorria fluxo de ar entre zonas, tornando cada região independente.

Para corroborar com tal situação, recorreu-se a estatística descritiva e realizou-se uma análise de variância entre as médias por meio do teste de Tukey a 5% de probabilidade. Nele, constatou-se que não existia diferença significativa entre os *Sheds* a 0° e a 180°.

Em contrapartida, quando se analisou a razão entre as velocidades internas e a velocidade de entrada, no Arco e no Lanternim eram maiores que a destes pontos no *Shed*, sendo significativa apenas para o primeiro, já que no segundo tipo de cobertura só existia diferença significativa quando comparado ao *Shed* a 180°. Imagina-se que,

para explicar tal resultado, uma análise do escoamento de ar em CFD fosse apropriada, pois, supõe-se que, no Arco, por possuir uma estrutura independente, fez com que a presença das pilastras desviasse o curso de algumas correntes de ar, redirecionando-as para dentro da ocupação. Fato similar, possivelmente, tenha ocorrido com o Lanternim.

Partindo para as simulações com uma única zona de ar, em outras palavras, para as simulações sem forro nos galpões, percebeu-se que apesar de uma maior área interna de circulação do vento, o comportamento variou de acordo com o tipo de ático ventilado. A Figura 16 mostra o gráfico da velocidade do ar, nos três pontos de medições, em função da frequência de rotação do ventilador.

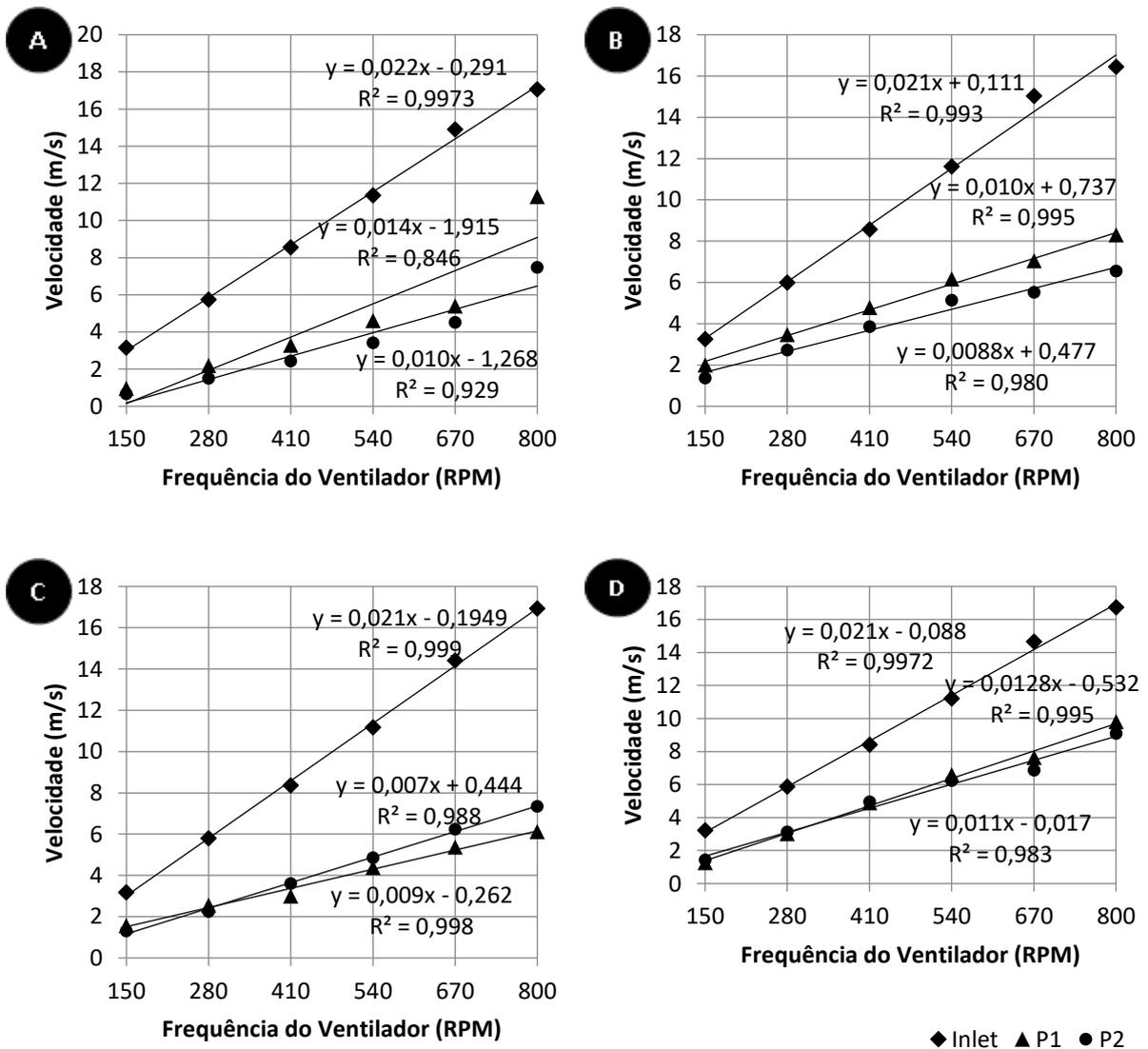


Figura 16: Velocidade do ar em função da rotação no do túnel de vento para as seguintes coberturas sem forro. A - Shed, a 0°; B - Shed, a 180°; C - Lanternim; D - Arco independente

Observa-se que em média, a velocidade de entrada foi 55% maior do que as velocidades internas. As linhas de tendência com ajuste linear aos pontos mostram uma maior taxa de variação da velocidade de entrada e menores taxas de variação nos pontos internos.

Este é um fator positivo quanto se deseja certa estabilidade do fluxo do ar no interior da edificação. Do mesmo modo, quando se pensa em conforto térmico, não é desejável variações no fluxo de ar no ambiente. Neste sentido, as coberturas em que as velocidades em P1 se aproximam às de P2 são favoráveis.

O Lanternim e o Arco, são coberturas bastantes viáveis, partindo do pressuposto da afirmativa do parágrafo anterior, já que, em ambos, as velocidades medidas em P1 e P2 estiveram muito próximas. Em contrapartida, no *Shed*, observou-se maiores diferenças, que chegaram a 25%, a depender da rotação do ventilador. A Tabela 3 demonstra a variação de velocidade em cada situação.

Tabela 3: Razão da velocidade nos diferentes tipos de galpões sem forro.

Tipo de Cobertura	P2/Entrada
<i>Shed</i> 0 Graus	0,30 a
<i>Shed</i> 180 Graus	0,42 b
Lanternim	0,42 b
Arco	0,52 c

Nota-se que o *Shed* a 0° apresentou a menor proporção de velocidades, quando comparado aos demais, inclusive a menor velocidade verificada em P2, a baixa rotação (150 RPM), foi verificada nesta situação. Isto porque o comprimento característico de cada água do telhado, 12,5 cm, possivelmente tenha ocasionado uma pequena turbulência na sua zona de ar, criando vórtices na fachada, um fluxo aleatório de ar e assim, desacelerando a entrada do ar no interior do galpão. O Arco apresentou a maior proporção, justamente por ter um comprimento característico maior, e uma cobertura aerodinamicamente favorável.

Lukiantchuki et al. (2016) citam, que, a depender do modelo de *Shed* utilizado ocorre uma modificação do fluxo de ar interno. Logo, na captação de ar, o fluxo de ar incidente na cobertura gera uma forte zona de separação com a formação de uma sombra de vento, ocasionando uma queda na pressão dos demais *Sheds*, fazendo com que apenas o primeiro capte ar e os demais o extraia.

Comparando-se os resultados da Tabela 3 com os da Tabela 2, pode-se observar uma mudança na razão das velocidades. No *Shed* a 180 graus, a velocidade entre tais pontos teve uma variação maior que a do *Shed* a 0 graus, fato este que pode ser explicado devido as características geométricas.

No *Shed* a 180° existe uma região frontal com menor altura, fazendo com que o escoamento do ar interno incida em um único local, no ponto de entrada, impedindo assim uma zona de turbulência na entrada e um movimento direcional das correntes de ar, tornando assim seu fluxo mais contínuo. Já no *Shed* a 0°, a entrada de ar na cobertura, possivelmente, faz com que seja gerado vórtices no telhado e que os ventos não escoem em uma única direção, dificultando um fluxo descendente do vento, reduzindo assim a ventilação interna nestas edificações.

Outra curiosidade diz respeito ao Lanternim, percebeu-se que ao fazer o teste de Tukey, sua significância é a mesma que a do *Shed* a 180°, obtendo inclusive a mesma razão entre os pontos (0,42) e velocidades semelhantes nas diversas rotações. Tal fato, possivelmente tenha ocorrido devido ao frontão que direcionava a velocidade no Lanternim para a região P2, aumentando assim sua velocidade quando comparada a condição sem forro, e conseqüentemente sua razão.

A Tabela 4 apresenta a relação das velocidades entre P1 e P2, na condição isenta de forro. Pode-se perceber que, ao analisar os *Sheds* a 0° e a 180°, o comportamento foi similar ao obtido na análise anterior.

Tabela 4: Razão da velocidade nos diferentes tipos de galpões sem forro.

Tipo de Cobertura	P2/P1
<i>Shed</i> 0 Graus	0,73 a
<i>Shed</i> 180 Graus	0,78 a
Lanternim	1,11 b
Arco	0,99 b

O Arco independente, por sua vez, teve uma redução na proporção de suas velocidades em 1%, provando assim que é um bom modelo de cobertura ventilada, quando se deseja a ventilação natural por ação dos ventos, pois existe um bom aproveitamento da circulação do ar interna. Para explicar tal acontecimento, pode-se remeter a sua geometria, que, por ser independente, possivelmente fez com que as correntes de ar ao fossem desviadas para a dentro da edificação ao longo do seu

escoamento, causando assim uma maior ventilação interna ao galpão e consequentemente uma maior região de entrada de ar.

Já no Lanternim, a abertura do frontão deve ter redirecionado o fluxo de ar para o ponto central do galpão (P2), de modo que a razão entre P2/P1 fosse acima de 1, em altas velocidades, tornando assim uma diferença significativa entre os resultados obtidos nos *Sheds* (a 0° e a 180°) e entre o Arco e o Lanternim.

A Figura 17 inclusive demonstra o comportamento de cada edificação nas rotações testadas. Perceba que as Aberturas no frontão sugerem que haja o aumento da velocidade do ar no interior da edificação, principalmente em rotações acima de 410 RPM. Enquanto que, para o Arco, a medida em que se aumenta a rotação, menor é o aproveitamento interno da ventilação, corroborando assim com a ideia da parede de ar citada anteriormente.

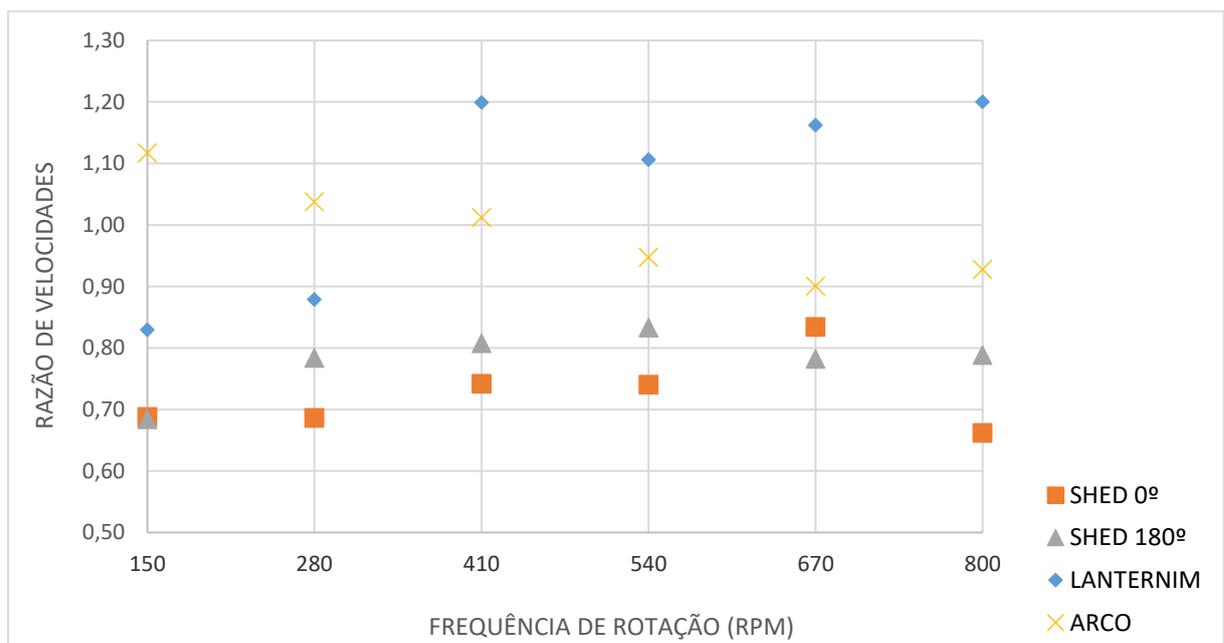


Figura 17: Relação entre a razão das velocidades dentro da edificação e a rotação do ventilador.

5.2. SIMULAÇÃO NO *ENERGYPLUS*TM

Após a análise do fluxo de ar nos diferentes tipos de coberturas ventiladas, realizou-se uma simulação energética no *Energyplus*TM, com o intuito de criar uma relação entre os dados aferidos no ensaio em túnel de vento e os dados

computacionais, para enfim determinar a eficiência de cada ático para o clima Tropical Semiárido.

A Figura 18 mostra os resultados da carga térmica no Shed e no Lanternim, em diversas orientações solares, com e sem forro de gesso. Percebeu-se que, o forro é eficiente quando se almeja reduzir a carga térmica em edificações. Estes resultados foram compatíveis aos obtidos por Cravo et al (2015), que, analisaram o efeito dos forros em galpões aviários, concluindo que, o forro é uma alternativa para amenizar o fluxo de calor para o interior dos galpões, reduzindo assim a carga térmica do ambiente.

Já nas simulações desta dissertação, notou-se que, para o *Shed*, o forro é um tem uma eficiência média de 30%. Enquanto que no Lanternim, o uso do forro de gesso reduziu a carga térmica apenas em 7%.

Percebeu-se também que, no *Shed*, por conter todos os áticos livres e expostos a entrada e/ou saída de ar, a ventilação natural por efeito chaminé provavelmente fosse mais eficiente que a do Lanternim, pois, no segundo tipo continham aberturas laterais nas coberturas, que não eram totalmente expostas, limitando a entrada e/ou saída de ar, dificultando assim o efeito chaminé, quando comparado ao primeiro.

Por fim, ao comparar a geometria de cada tipo de cobertura, nota-se que o comportamento de “zigue-zague” no *Shed*, pode ter criado uma área de sombreamento nas demais superfícies do telhado, fazendo com que ocorresse uma maior amplitude térmica entre a saída de ar e o interior do galpão, tornando o efeito chaminé mais eficiente. Este resultado pode ser explicado remetendo-se ao estudo de Neves (2012), nele, a autora explica que quanto mais elevada for a temperatura nas saídas de ar, mais eficiente será o efeito chaminé e, conseqüentemente, menor será a carga térmica da edificação.



Figura 18: Carga térmica [kW] do *Shed* e do *Lanternim* em diversas orientações solar, com e sem forro.

Ainda a respeito da Figura 18, ao comparar as cargas térmicas em função da orientação solar, observou-se um melhor desempenho das edificações orientadas no sentido longitudinal Leste-Oeste, ou seja, a 90° (*Lanternim* e *Shed* como captador de vento) ou 270° (*Shed* como extrator de vento) e ventos predominantes a Leste (a 6° da fachada). Este resultado corrobora com as recomendações feitas por Dacanal et al. (2018) relacionadas à orientação solar para *packing houses* em clima quente e seco.

Ainda a respeito dos *Sheds*, Lukiantchuki et al (2016) explicam que, na extração de ar no *Shed*, o fluxo interno é contínuo e distribuído ao longo da edificação, quando a incidência de ar é perpendicular a fachada das aberturas. Assim, o ar atravessa a abertura a barlavento, com altas velocidades, sofrendo uma redução após entrar no

espaço, devido à expansão da corrente de ar. Já, quando o *Shed* atua como captador de ar, o fluxo incidente na cobertura com altas velocidades gera uma forte zona de separação com a formação de uma sombra de vento, ocasionando uma queda na pressão das demais água. Isso pode explicar a menor carga térmica obtida nas simulações do *Shed* nas orientações de 0° e 45° , quando comparada as de 180° e 225° .

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os testes de túnel de vento mostraram resultados importantes para a análise do fluxo de vento. O ensaio nas diferentes coberturas ventiladas, sem forro, mostrou que:

- A maior circulação de ar interna ocorreu no Arco independente e no Lanternim, dependendo da velocidade de entrada. Em altas velocidades, o Lanternim apresentou os melhores resultados para o fluxo de ar, sugerindo que o frontão funcione como um dissipador de ar que conduz o vento para a região central da edificação. O Arco independente, em baixas velocidades, melhorou a o fluxo de vento no galpão, devido à sua geometria aerodinamicamente favorável, resultando em um aproveitamento de 99% da velocidade do ar na entrada do galpão.

As simulações computacionais permitiram concluir que:

- A carga térmica do *Shed* é menor que a do Lanternim, em todas as situações, tornando-a melhor opção de ático ventilado dentre as testadas.
- A presença de forro de gesso diminuiu a carga térmica interna no galpão em 30% no *Shed*, e 7% no Lanternim.

Ao confrontar os resultados obtidos nos testes no túnel de vento com os resultados das simulações em *EnergyPlus*TM, constatou-se uma relação direta entre o tipo de cobertura e a carga térmica, concluindo-se que quanto menor a ventilação interna, menor a carga térmica.

Por fim, baseando-se em todas as conclusões anteriores, pode-se verificar que a melhor cobertura ventilada visando o desempenho térmico para o clima tropical semiárido foi o *Shed* como extrator de vento (Orientação longitudinal L-O, com vento incidente a 6º na fachada).

Com relação a trabalhos futuros, sugere-se um estudo em CFD, que analise o escoamento ao longo de toda a edificação e as temperaturas internas, criando assim uma relação entre a carga térmica e cada tipo de ventilação natural.

Uma outra sugestão para estudo futuro seria a estimativa da perda de calor por meio do efeito chaminé, através de ensaio em túnel de vento, com modelos reduzidos, e utilizando uma fonte de calor externa a edificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Orientação Técnica sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior, em Ambientes Climatizados Artificialmente de uso Público e Coletivo. Brasília, 2003. (Resolução RE9).

AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE. Laboratório Referência do Ambiente. Qualidade do Ar em espaços interiores. Amadora.2009

AKUTSU, M. **Métodos para avaliação do desempenho térmico de edificações no Brasil**. Tese de Doutorado da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. São Paulo -SP, Universidade de São Paulo, 1998. 156p.

ALCALDE, A.M. **ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE UN EDIFICIO CON ENERGY PLUS**. 167p.2010. Titulación : Ingeniería Técnica Industrial en Electrónica Industrial ETSE- Escola Técnica Superior Enginyeria.

ALVARES, C. A. et al. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, vol. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR CONDITIONING ENGINEERS **ASHRAE Handbook - Fundamentals**, Atlanta, 2011.

ANDELKOVIĆ *et al.* Experimental validation of a EnergyPlus model: Application of a multi-storey naturally ventilated double skin façade. **Energy and Buildings**, V. 118, p. 27–36, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220/3**: Desempenho térmico em edificações. Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220/3**: Desempenho térmico em edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16401/1**: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projeto das Instalações. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16401/3**: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 3: Qualidade do ar Interior. Rio de Janeiro, 2008.

BAÊTA, F. C. SOUZA, C. F. **Ambiência em edificações rurais: conforto animal**. 2. ed. Viçosa: UFV - Universidade Federal de Viçosa, 2010. 269 p.

BARBOSA et al. Método de utilização do programa Energyplus para verificação de desempenho térmico de ambientes com fachadas duplas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 121-134, jul./set. 2013.

BARROS *et al.* Endividamento Agrícola: Quão Comprometidos São Os Produtores Do Polo Petrolina-Juazeiro Frente A Suas Dívidas? **Economia Aplicada**, v. 19, n. 1, 2015, pp. 171-200.

BITTENCOIRT, L.S. (1995). **Comparando os programas Breeze e Easyflow como instrumentos de simulação da ventilação natural**. In: Encontro Nacional De Modelos De Simulação De Ambientes, 1995, São Paulo. Anais... São Paulo: ENMSA, 1995. p. 177-188.

BITTENCOURT, L. CÂNDIDO, C. **Introdução à Ventilação Natural**. 4. ed. Maceió – AL: Edufal, 2015, 176p.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA. Resolução RE n. 9 de 16 de janeiro de 2003. Orientação técnica elaborada por grupo técnico assessor sobre padrões referenciais de qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. D. O. U., Poder Executivo, Brasília, DF, 20 de janeiro de 2003. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/33880/2568070/RE_09_2003.pdf/f4af80d4-8516-4f9c-a745-cc8b4dc15727>. Acesso em: 25 mar. 2017

BRASIL. Instrução Normativa DVS Nº 11 DE 23/03/2016

CARNEIRO, T. A. *et al.* Condicionamento térmico primário de instalações rurais por meio de diferentes tipos de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, v.19, n.11, p.1086–1092. 2015.

CARTAS, J. F. D. N. **Simulação dinâmica de um edifício de escritórios com os programas EnergyPlus e Trace 700**. 2011. 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa. 2012.

CATALDO, J. et al. Wind damage on citrus fruit study: Wind tunnel tests. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 116, p.1–6. 2013

CAVALCANTI et Al. Análise da qualidade do ar interior sob a abordagem da manutenção preditiva e da inovação. **Exacta – EP**, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 45-54, 2015.

CHIARELLO, J. A. **Ventilação natural por efeito chaminé – Estudos em modelo reduzido de pavilhões industriais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em engenharia civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006

CHRISTMANN, S. S. et al. Estudo da ventilação natural em uma edificação residencial. **Revista gestão e desenvolvimento em contexto- GEDECON**, Cruz Alta – RS, v. 3, n. 1, p. 13-24. 2015.

COSTA, G. B. LYRA, R. F. F. Análise dos Padrões de Vento no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.1, 31 - 38, 2012

CRAVO, J.C.M. et al. Compósito À Base De Resíduos Agrícolas Para Aplicação Como Forro Em Aviários. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 9(4), p. 358-367, 2015.

CRAWLEY, D.B., et al. A new-generation building energy simulation program. **Energy and Buildings**. Great Britain, Elsevier Science. 2002

CUI, P-Y et al. Wind-tunnel measurements for thermal effects on the air flow and pollutant dispersion through different scale urban áreas. **Building and Environment**, v. 97, p. 137-151, 2016.

CUNHA, L. J. B. F. **Análise de métodos para aplicação de ventilação natural em projetos de edificações em Natal – RN**. 2010. 140 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.

DACANAL, C. *et al.* Diagnóstico e recomendações para a arquitetura bioclimática de packing houses de uvas no vale do submédio são Francisco. **Revista Engenharia Agrícola**, v.38, n. 1, 6p. 2018

DAISH, N. C. *et al.* Impact of aperture separation on wind-driven single-sided natural ventilation. **Building and Environment**, v. 108, p. 122-134, 2016.

DE FIGUEIREDO, C.M. **Ventilação Natural em Edifícios de Escritórios na cidade de São Paulo**: Limites e Possibilidades do ponto de vista do conforto térmico.2007. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – FAUUSP, USP, São Paulo, 2007.

ELETROBRAS; PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL); INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL. **Elaboração e atualização do Código de obras e edificações**. Rio de Janeiro, RJ: Procel, 2012. 319 p.

ELSHAFEI, G. *et al.* Numerical and Experimental Investigations of the Impacts of Window Parameters on Indoor Natural Ventilation in a Residential Building. **Energy and Building**, v. 141, p. 321-332, 2017.

ENERGYPLUS™. 2016. **Getting Started**. *US Department of Energy, September(c)*, 90p. http://doi.org/10.1007/978-1-4419-5525-8_2

ENERGYPLUS™. atualizado em 31 mar. 2017. Disponível em:< <https://energyplus.net/> >. Acesso em: 20 abr. 2017

ETHERIDGE, D. **Natural Ventilation of Buildings**: Theory, Measurement and Design, 12(6), 428. 2012

FANGER, P. O. *et al.* Air Turbulence and Sensation of Draught. **Energy and Building**, v. 12, p 21- 39.1988.

FAO, 2003. **MAIZE**: Post-Harvest Operation. MEJIA, D. 100 p.

FAO, 2012. **Good practice in the design, management and operation of a fresh produce packing-house**. Bangkok, 2012. 188 p.

FAO, 2014. **Appropriate Seed and Grain Storage Systems for Small-scale Farmers**. TARUVINGA, C. MEJIA, D. ALVAREZ, J.S. 52 p.

GALTER, M. D et al. **Ação Do Vento Em Modelo Reduzido De Casca De Forma Livre De Planta Pentagonal Apoiada Nos Vértices**. CILAMCE 2015 Proceedings of the XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering Ney Augusto Dumont (Editor), ABMEC, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, November 22-25, 2015.

GOULART, S. V. G. **Dados Climáticos para Avaliação de Desempenho Térmico de Edificações em Florianópolis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Florianópolis - SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 1993, 124p.

GRAÇA, G. C. LINDEN, P. Ten questions about natural ventilation of non-domestic buildings. **Building and Environment**, v. 107, p. 263-273, 2016.

IFFA, E. TARIKU, F. Attic baffle size and vent configuration impacts on attic ventilation. **Building and Environment journal**, v. 89, p 28–37. 2015.

IFFA, E. TARIKU, F. Temperature and Air Flow Patterns in Attic Roofs. **Journal of Architectural Engineering**, v. 23, issue 3, 11p., sep. 2017

INMET. atualizado em 14 dez. 2017. Disponível em:< <https://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

JUNIOR et al. Ambiente térmico no interior de modelos físicos de galpões avícolas equipados com câmaras de ventilação natural e artificial. **Revista Engenharia na agricultura**, Viçosa - mg, p 166 – 179, mai./jun. 2009.

JUNIOR, D. P. et al. Desenvolvimento de um túnel de vento compacto para simulações didáticas de projetos de engenharia mecânica. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), VI, 2012, São Luís. 8p. **Anais**

JUNIOR, M. R. et al. Análise de ventilação natural em habitação popular. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 21., 2013, São Paulo. **Atas...** 28 p.

KLEIN, G. M. B. **Determinação dos Efeitos Da Vizinhança Na Eficiência dos sistemas de ventilação natural em pavilhões industriais**. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

LOREDO-SOUZA, A. M. et al. Estudo em Túnel de Vento da Cobertura do Estádio Beira-Rio. **Congresso Latino-Americano Da Construção Metálica**, 2010.
LSTIBUREK, J. BSD 102 : Understanding Attic Ventilation Abstract. **Building Science Corp**, p.1–12.2006.

LUKIANCHUKI, M. A. et al. *Sheds* extratores e captadores de ar: influência da geometria e da dimensão das aberturas no desempenho da ventilação natural nas edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 83-104, jan./mar. 2016.

LUKIANCHUKI, M. A. et al.. Natural Ventilation by Air Captors and Extractors *Sheds* in Hospitals. Wind Tunnel Measurements. **Journal of Civil Engineering and Architecture (Print)**, v. 8, p. 1293, 2014.

LUKIANCHUKI, M. A. **Sheds extratores e captadores de ar para indução da ventilação natural em edificações**. São Carlos, 2015. 363 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, 2015.

LUZ, S. N. **Caracterização construtiva de *packing houses* de uvas na RIDE Petrolina/ Juazeiro e proposição de uma lista de verificação para o desenvolvimento de projetos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Juazeiro – BA, Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2016. 88p.

MARTINS, G. B. et al. Túnel de vento: uma importante ferramenta a serviço de tecnologias sustentáveis. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE, 1., 2013, São Paulo. **Anais...** 28 p.

MATSUMOTO, E. et al. **Túnel De Vento Do LaCAF/FEC/Unicamp - Instrumento Para Ensaios De Modelos Físicos Reduzidos E Ventilação Natural**. Disponível em < <http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/cliv2/public/actas%20congreso/39.Matsumoto.CLIV2.pdf> >. Acesso em 16 abr. 2017.

MAZON, A. A. O. et al. Ventilação natural em galpões: o uso de lanternins nas coberturas. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, p. 179-184, abr./ jun. 2006.

MEISS, A. et al. Methodology Applied to the Evaluation of Natural Ventilation in Residential Building Retrofits: A Case Study. **Energies**, v.10, 19 p., 2017.

MELO et al. **Apostila Do Curso Básico Do Programa *EnergyPlus*TM**. LABEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. 24p. 2009.

MELO, E. C. S. *et al.* Regimes do vento à superfície na área de petrolina, submédio são Francisco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.3, 2013, p. 229 – 241.

MENDELL, M. J. *et al.* elevated symptom prevalence associated with ventilation type in office building. **Epidemiology**, v.7, n.6, 1996, p 583 - 589.

MONQUEIRO, L. H. DE MORAES, L. F. G. **Túneis de vento (baixo subsônico)**. 2012. Disponível em: < https://educacaoespacial.files.wordpress.com/2010/10/ijespacial_11_tuneis_de_vento.pdf >. acesso em: 31 mar. 2017.

MORISHITA, C. SCHMID, A. L. (2007). Ventilação Natural Por Efeito Chaminé Em Sobrados : Um Estudo Do Uso Desta Técnica Pelos Arquitetos Do Paraná, (1), 1258–1267.

NEVES, L. de O. **Chaminé solar como elemento indutor de ventilação natural em edificações**. 2012. 158 p. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP,

NEVES, L. O. RORIZ, M. Procedimentos estimativos do potencial de uso de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.12, n.1, p. 177 – 192, jan./mar. 2012.

NGUYEN, Q. Y. Designing, Constructing, And Testing A Low – Speed Open – Jet Wind Tunnel. **International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)**, V. 4, Issue 1(Version 2), p.243-246, jan. 2014.

OLIVEIRA, E. H. *et al.* Estudo de parâmetros da ventilação natural para maximização do conforto térmico em pavilhões industriais: simulações numéricas. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, V. 8, n. 2, p.1-12. jun. 2014.

OPENSTUDIO®. atualizado em 14 dez. 2016. Disponível em:< <https://www.openstudio.net/> >. Acesso em: 20 abr. 2017.

PASSINI, R. *et al.* Intervenção ambiental na cobertura e ventilação artificial sobre índices de conforto para aves de corte. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB,v.17, n.3, p. 333-338. 2013.

POTTER, M. C. WIGGERT, D. C. RAMADAN, B. H. **Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 711 p.

SACHT, H. et al. Study of Natural Ventilation in wind Tunnels and Influence of the Position of Ventilation Modules and Types of Grids on a Modular Façade System. **Energy Procedia**, 96(October), p. 953–964.2016.

SIQUEIRA, T. C. P. A. et al. Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 58, n. 2,p. 133-139, apr.jun. 2005.

TEIXEIRA, Antônio Heriberto de Castro. **Informações Agrometeorológicas do Polo Petrolina, PE/Juazeiro, BA - 1963 a 2009**. Petrolina, PE: Embrapa Semiárido, 2010.

UZUELLI, A. G. et al. **Túnel de Vento da FAUUSP** - Instrumento para ensaios de modelos físicos em conforto ambiental, 6p.2009.disponível em <
<http://docplayer.com.br/33790941-Tunel-de-vento-da-fauusp-instrumento-para-ensaios-de-modelos-fisicos-em-conforto-ambiental.html>>. Acesso em : 03 abr. 2017

WALKER, I.S. FOREST, T. W. Field Measurements in Attics. **Science**, v. 30, n.3, p 333–347, 1995.

WALLAUER, M. D. **UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA ENERGYPLUS PARA A SIMULAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES POPULARES EM QUATRO CAPITAIS BRASILEIRAS**.2003.121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade federal do rio grande do sul. Programa de pós-graduação em engenharia mecânica (PROMEC). Porto Alegre.2003.

YANG, W. et al.. An empirical study on the energy-saving technology integration of the rural architecture in Central China. **International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)**. Lushan, China. 2011, p.68-71.

YU, O.-Y. MOORE, S. A case study for the effectiveness of solar-powered attic ventilation fans. **Energy Efficiency**, v.8, n.4, p. 691–698. 2015