XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

INFLUÊNCIA DAS ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS EM UMA ESCOLA POR ANÁLISE DE SENSIBILIDADE LOCAL

Gabriela Hanna Tondo (1); Ana Mirthes Hackenberg (2); Elisa Henning (3)
(1) Mestra, Professora do curso de Arquitetura e Urbanismo, gabriela.tondo@avantis.edu.br, Uniavan
(2) PhD, Professora do Departamento de Engenharia Civil, ana.hackenberg@udesc.br,
(3) Doutora, Professora do Departamento de Engenharia Civil, elisa.henning@udesc.br,
Universidade do Estado de Santa Catarina, Rua Paulo Malschitzki, 200
Zona Industrial Norte, Joinville / SC - CEP: 89.219-710 – (47) 3481-7936.

RESUMO
A crescente escassez de recursos energéticos e o aumento da sua demanda têm motivado o estudo do desempenho das edificações. A norma, no Brasil, que sugere diretrizes construtivas para o desempenho térmico da edificação, conforme a zona bioclimática, é a NBR 15220. Dentre os diversos edifícios públicos, as escolas, foco desse estudo, são as que possuem maior responsabilidade social. O seu desempenho é de grande importância, pois as condições de conforto da edificação têm reflexo na performance dos usuários. Assim, esse trabalho tem como objetivo avaliar os parâmetros mais influentes em uma edificação escolar na cidade de Joinville, Santa Catarina. Para tal, foi realizado um estudo de caso em uma escola na cidade de Joinville em uma escola de ensino básico da rede municipal da cidade. Foram aplicadas as estratégias e índices recomendados na NBR 15220 para zona bioclimática da cidade. Simulou-se a combinação de diversos casos com o programa Energyplus, avaliando a temperatura interna da edificação. Os melhores resultados foram avaliados pela análise de sensibilidade local, mostrando a influência de cada parâmetro nesse estudo. Os resultados dessa análise indicaram que a ventilação noturna foi um dos fatores mais importantes no desempenho, principalmente nos períodos mais quentes. As paredes internas com alta massa térmica e os elementos de proteção não foram parâmetros sensíveis no modelo. A absortância e o material da cobertura foram elementos significativos no conforto da edificação. Assim, concluiu-se que os parâmetros mais influentes na edificação analisada dizem respeito à ventilação natural e à cobertura sendo que a sua absortância solar e material foram parâmetros bastante sensíveis no modelo.
Palavras Chave: Desempenho de edificações; simulação térmica; análise de sensibilidade local.

ABSTRACT
The shortage of energy resources and its increasing demand give rise to the study of building performance. The norm in Brazil, which suggests constructive guidelines for the thermal performance of the building, according to the bioclimatic zone, is the NBR 15220. Among many public buildings, schools (the focus of this study) are those with the greatest social responsibility. Its performance is very important because the comfort conditions of the building affect student's performance and learning. This work aims is to evaluate the most influential parameters in a school building in the city of Joinville, Santa Catarina state. For that, a case study was carried out at a school in the city of Joinville in a primary school of the city's municipal network. In the case was applied strategies and indexes recommended in NBR 15220 for the bioclimatic zone of the city. The school was simulated in several scenarios using the Energy Plus program, evaluating the internal temperature of the building in this study. The best results were evaluated by the local sensitivity analysis, leading to the influence of each parameter. These analysis results indicated that the nocturnal ventilation is one of the most important factors in comfort, causing an improvement in the indices, especially in the warmer periods. The internal walls with high thermal mass and the shading elements are not sensible parameters in the model. Absorption and the use of insulation material in the roof is one of the most important elements in the comfort of the building. It was concluded that the most influential parameters in the analyzed building were related to natural ventilation and the roof. The material and solar absorptivity of the roof were very sensitive parameters in the model.
Keywords: Building performance; thermal simulation; local sensitivity analysis.

1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica nas edificações no Brasil é de 51% do total consumido, desses, 25,5% são de edificações comerciais e públicas (EPE, 2017). Assim, a eficiência energética torna-se mais uma condicionante a ser considerada no projeto das edificações, sendo a qualidade do edifício mensurada tanto pela estética e funcionalidade quanto pelo uso racional dos recursos energéticos e do seu desempenho térmico.

Para se alcançar um edifício energeticamente eficiente devem ser ponderados fatores desde o uso da edificação, a eficiência dos equipamentos e sistemas instalados até a envoltória. Entre as várias estratégias e fatores capazes de reduzir o consumo de energia pode-se citar a utilização de materiais construtivos adequados na envoltória, avaliando a transmitância e capacidade térmica. Isso é salientado pelos trabalhos de Pereira e Ghisi (2011) e Lara et al. (2015), que a partir de medições e simulações concluíram que esses interferem de forma considerável no desempenho da edificação.

Influem também na eficiência energética, a orientação solar, o tamanho e forma da edificação (Matos et al., 2014), assim como a cor das paredes (Almeida, 2014). Além disso, a correta localização das janelas e posicionamento dos elementos de proteção solar e vidros com desempenho apropriado, representam fatores preponderantes no consumo energético (Fonseca et al., 2010; Lopes, 2016). Outro fator a ser considerado é o aproveitamento eficiente da ventilação natural que diminui a taxa de desconforto por calor, incrementando as perdas por convecção e corrigindo o excesso de umidade (Lamberts, Dutra, Pereira, 2014).

Dentre as diversas edificações, as escolas são as que possuem maior responsabilidade social. A performance energética desse tipo de edificação é de grande importância, pois possui uma ampla representatividade social, atinge diferentes classes e uma variada gama de pessoas (Pereira et al., 2014). As condições de conforto e qualidade interna do ar da edificação têm reflexo no desempenho dos usuários, sendo que em escolas, os impactos são maiores do que em outras edificações, pois a aprendizagem pode ser prejudicada pela ausência de condições necessárias, com consequências a curto e longo prazo (Brandão, 2009).

No Brasil, o ambiente físico construído de escolas públicas apresenta, no geral, qualidade arquitetônica pouco expressiva, níveis de conforto mínimo, superlotação das salas e a impossibilidade de criar diferentes arranjos internos, conforme eventuais necessidades e diferentes atividades. Apesar disso, as intervenções de melhoria são possíveis, no caso de conforto ambiental, encontrando-se soluções simples, na maioria dos casos (Kowaltowski, 2011; Baez, Padura e Huelva, 2019). Como exemplo, pode-se citar mudança da cor das edificações, implantação de ventilação cruzada, uso de elementos de proteção solar e orientação Norte-Sul. Mudanças na cobertura também são opções efetivas (Androutsopoulos, Stavrakakis e Damasiotis, 2017).

Como a energia consumida por essas edificações também representa uma considerável despesa para os cofres públicos (Pereira et al., 2014), faz-se necessário a discussão sobre o seu desempenho térmico. Rospi et al (2017) a partir de simulações, analisaram a performance termo energética em oito escolas no sul da Itália, com a implementação de diferentes estratégias para a envoltória. As estratégias utilizadas podem resultar em até 90% de consumo de energia.

No entanto, no Brasil, não há referências e normas que indiquem diretrizes construtivas para as edificações escolares e nem um benchmark para o clima em estudo. Uma das normas mais abrangentes é a NBR 15220 (ABNT, 2005). Essa foi desenvolvida para edificações de interesse social, porém na falta de uma norma específica para escolas, adotaram-se as suas diretrizes, apesar das diferenças de tipologia e uso da edificação. Nesse sentido, é essencial o estudo de edificações escolares para identificar e estabelecer diretrizes adequadas.

Para a zona bioclimática da cidade em estudo, são recomendadas as seguintes estratégias: sombreamento de aberturas, ventilação natural, inércia térmica para aquecimento, utilização de paredes leves e refletoras e cobertura leve e refletora. A NBR 15220 recomenda, no quesito de ventilação natural, que as aberturas sejam de tamanho médio (15% a 25% da área do piso) e que se aplique a ventilação cruzada no verão. Recomenda também inércia térmica nas paredes internas, para que essas não provoquem um efeito indesejado no verão, acumulando o calor durante o dia e liberando no período noturno, que ainda é quente em regiões úmidas. Cabe ressaltar, que essa norma foi desenvolvida para residências, onde o período de maior permanência é o noturno, o que pode invalidar essas estratégias.

As paredes consideradas leves na norma possuem um atraso térmico igual ou inferior a 4,3 horas. Embora essa seja a recomendação para Joinville, estudos indicam que as paredes pesadas apresentam maiores índices de conforto nessa zona bioclimática (Ferreira; Souza; Assis, 2017).

Quanto à absortância solar das paredes externas, não há exigência específica na NBR15220 (ABNT, 2005), ela consta apenas indiretamente no Fator Solar. No entanto, configura-se como um dos fatores mais

influentes do desempenho térmico da envoltória, conforme Ferreira, Souza e Assis (2017) e Almeida (2014), sendo que as indicadas são as refletoras, de cores mais claras que evitam a absorção de calor por radiação solar.

A recomendação da cobertura categorizada como leve e isolada é de um valor de transmitância térmica menor ou igual a 2 W/m² K (ABNT, 2005). Esse valor, segundo Bogo (2016), é considerado alto para algumas zonas bioclimáticas, pois aplicando o Método das Tabelas de Mahoney (MAHONEY, 1971) foi verificado um rigor climático de calor em cidades onde a recomendação é de transmitância térmica menor ou igual a 2 W/m² K. Observa-se, ainda, que com o uso de um elemento de isolamento térmico do tipo radiativo (lâmina de alumínio) ou do tipo resistivo (lã de vidro), o valor da transmitância diminui para cerca de 1,18 a 0,62 W/m² K, de acordo com a NBR 15220.

Outro tópico abordado nesse trabalho para a cobertura é a sua absortância solar. Essa, embora conste na norma apenas como parte do fator solar da cobertura é um dos quatro fatores mais influentes no desempenho térmico da edificação, conforme estudo de Almeida (2014). Na cobertura, o melhor desempenho desse elemento é com cores claras, pois predomina o desconforto por calor (Matos, 2007).

2. OBJETIVO

Este artigo tem como objetivo avaliar alguns parâmetros, baseados na NBR15220-3, no desempenho térmico de uma escola da rede municipal de Joinville (SC); por meio de simulação computacional, utilizando a análise de sensibilidade local como meio para validar os resultados.

3. MÉTODO

Para esse estudo de caso, selecionou-se uma escola real da rede municipal de Joinville (Figura 1). Essa foi levantada em seus aspectos físicos e espaciais e simulada pelo programa Energyplus.



Figura 1 – Fotos da escola do estudo de caso

O edifício foi modelado no SketchUp por meio do plugin Legacy OpenStudio (Figura 2), seus parâmetros foram utilizados como caso base para a simulação.

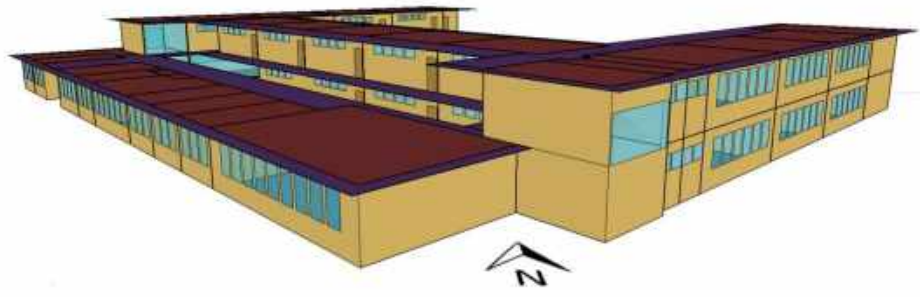


Figura 2 - Modelo para simulação

A Figura 3 apresenta as zonas térmicas simuladas tendo sido selecionadas as zonas térmicas das salas de aula nas quatro orientações existentes, no primeiro e no segundo pavimento. As zonas escolhidas foram selecionadas por serem as com maiores somas de graus-hora total e menores índices de conforto entre as zonas que estavam na mesma orientação e possuíam a mesma área, distribuição e tamanho de aberturas.

As janelas são todas iguais, basculantes, de vidro comum (e = 3mm), FS = 0,87, com montantes em ferro, e a área envidraçada corresponde a 19,86% da área de fachada. A ocupação nas salas de aula é de 30

alunos por sala, conforme média encontrada no levantamento realizado. Na sala de aula pequena (Zona 8), foi utilizada uma ocupação de 25 alunos.

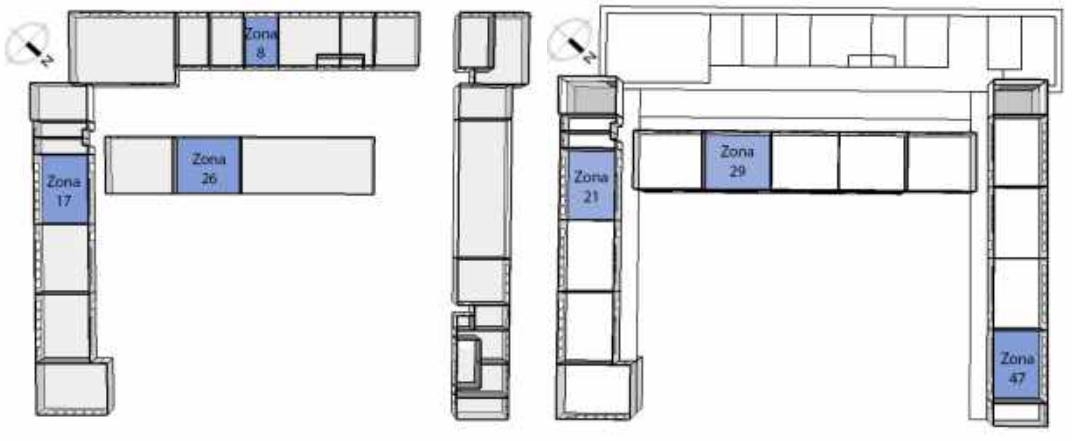


Figura 3 – Esquema zonas térmicas no térreo e 1° Andar.

3.1 Simulação do modelo

A edificação selecionada foi modelada no programa Energyplus (versão 8.5) (DOE, 2017) com as suas características de tipologia, dimensões e materiais existentes na realidade. Conforme Grunberg (2014), Joinville, localizada na zona bioclimática 5 (ABNT, 2005), apresenta um clima heterogêneo e estações do ano bem definidas. A carta bioclimática mostra uma taxa de conforto significativa ao longo do ano, mas que sofre variações, sendo o verão o período com a maior taxa de desconforto. De maio a outubro se tem os maiores índices de conforto. O uso de condicionamento mecânico de ar, como estratégia de conforto, fica restrito a apenas 6,77% dos períodos do ano. Assim, na maior parte do ano é possível usar estratégias passivas para aumentar o conforto térmico nas edificações.

A cidade não possuía um arquivo climático próprio na época da pesquisa, desse modo, a recomendação da norma NBR 15.575 (ABNT, 2013) é que se empregue o arquivo climático disponível mais próximo em distância e latitude. Nesse caso, foi utilizado o arquivo climático da cidade de Itapoá, também localizado na zona bioclimática 5, elaborado por Roriz (2012) e disponibilizado no site do LabEEE (<www.labeee.ufsc.br>).

As análises elaboradas até o presente momento mostram similaridades entre os climas. Cechinel et al (2017) mostram que os climas das duas cidades apresentam similaridades. As temperaturas médias das duas cidades ficam próximas de 20°C, com média 19,9°C (desvio padrão 4,2°C) em Itapoá e média 21,1°C (desvio padrão 4,1°C) em Joinville.

Adotou-se como temperatura de *setpoint* 20ºC, que é a temperatura limite adotada para o conforto térmico. O funcionamento da escola foi modelado conforme o horário de funcionamento real: das 7:30h às 11:45h e das 13:15h às 17:30h, de segunda-feira a sexta-feira.

Foi adotado o nível de iluminação A para escolas, que é de 10,7 W/m^2. Esse valor foi escolhido para que a carga de iluminação não interferisse na análise, considerando uma iluminação eficiente. Não foi considerada nenhuma carga referente aos equipamentos. Também não foram considerados os aparelhos e equipamentos referentes à cozinha. Após a simulação do modelo de referência, foram realizadas as simulações paramétricas de acordo com as recomendações da norma para a zona de Joinville

Quanto à ventilação, a recomendação do tamanho das aberturas é atendida em 100% das salas de aula e a aplicação da ventilação cruzada é utilizada em 89.5% delas. Como forma de otimização, utilizou-se uma ventilação seletiva com controle de temperatura, aplicando um setpoint de 20ºC, durante todo o dia e também durante toda a noite, visando retirar o calor acumulado durante o dia.

Em relação às paredes existentes, verificou-se que se encontram fora da norma quanto ao atraso térmico, que é maior que o recomendado. Propôs-se, desse modo, uma parede mais leve, conforme a recomendação da norma. Como alguns estudos apontam que paredes pesadas possuem um melhor desempenho em climas semelhantes ao da região, foi proposto uma opção de parede externa com baixa transmitância térmica (1,0 W/m2.K) e um alto atraso térmico, 10,8 horas.

As paredes internas existentes apresentam atraso térmico inferior ao recomendado pela norma, assim propôs-se uma parede com maior inércia térmica e maior atraso térmico (GRIGOLETTI; SATTLER, 2010).

A cobertura presente na maior parte da edificação é a com telhas de cerâmica, acima do atraso térmico recomendado pela norma. A outra cobertura presente apenas em uma sala de aula é a com telha de

fibrocimento e forro de PVC, dentro da norma.

Considerando o sombreamento de aberturas, para o correto dimensionamento dos elementos de proteção solar, foram elaboradas as máscaras de sombra de cada orientação, visando proteger a edificação da incidência solar direta entre as 9h e as 16h nos meses de verão. As máscaras de sombra foram elaboradas no programa Analysis SOL-AR (LabEEE, 2016).

Na absortância solar das paredes e cobertura foram simuladas cores mais claras do que as existentes. A Tabela 1 apresenta o resumo dos valores adotados para cada variável. Cada estratégia foi simulada individualmente, com o intuito de avaliar a influência de cada uma no conforto térmico dos ambientes de maior permanência: as salas de aula.

Tabela 1 – Resumo das alternativas de simulação

Parâmetros	Caso Base	Alternativas
Ventilação	Horário de funcionamento	Durante 24h
Paredes externas	Tijolos cerâmicos 6 furos assentados na maior dimensão (20cm)	Tijolos 6 furos assentados na menor dimensão (15cm)
		Parede dupla, tijolos 8 furos, assentados maior dimensão (46cm)
	α =0.44	α =0.3
Paredes internas	Tijolos cerâmicos 6 furos assentados na maior dimensão (20cm)	Tijolos maciços 23cm (25cm)
Cobertura	Parte com telha fibrocimento e forro de PVC e parte com telha cerâmica e laje de 12cm	Toda a edificação com telha fibrocimento e forro de PVC
		Toda edificação com telha cerâmica e lã de vidro sobre forro de madeira
	Fibrocimento - α=0.65	α=0.4
	Cerâmica - α=0.75	α=0.2
Sombreamento de aberturas	Beiras de 80cm	Sem sombreamento
		Com brises

3.2 Análise de sensibilidade

Após as simulações foi aplicada a análise de sensibilidade local. A análise de sensibilidade local (AS), com o método *one-at-a-time* (TIAN, 2013). A AS local está focada nos efeitos de incerteza das entradas em torno de um ponto (ou caso base), ou seja, ela considera a variação do parâmetro de saída contra a variação do parâmetro de entrada sobre um determinado valor x (HAMBY,1994; PIANOSI *et al.,* 2016).

A partir dos melhores resultados de cada parâmetro, obtidos nas simulações das salas de aula, foi aplicada a análise de sensibilidade no mês de março e de junho, meses com a maior e menor temperatura do ano respectivamente. O parâmetro resposta foi a temperatura operativa das horas ocupadas, 7h as 18h, de cada zona térmica em estudo.

Utilizou-se um índice de sensibilidade (IS), cuja fórmula é definida pela Equação 1 (FERREIRA, 2013; TILL; MEYER, 1983):

$$SI = \frac{Dmáx - Dmín}{Dmáx} \qquad \text{Equação 1}$$

onde:

$D_{máx}$ – Corresponde ao maior valor dos percentis de referência (Θ10, Θmédio e Θ90) que se obtém através das simulações com os valores limite de cada parâmetro;

$D_{mín}$ – Corresponde ao menor valor dos percentis de referência (Θ10, Θmédio e Θ90) que se obtém através das simulações com os valores limite de cada parâmetro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Baseado nos resultados das simulações paramétricas, selecionaram-se as melhores estratégias que foram: as paredes externas mais claras com absortância solar de 0,3; as paredes externas duplas com alta inércia térmica; as paredes internas maciças também com alta inércia térmica; o caso com aplicação de elementos de proteção solar (brises); a cobertura com telha cerâmica, lã de vidro e forro de madeira; a cobertura com absortância solar de 0,2 e o uso da ventilação durante 24h com controle por temperatura. Sobre o resultado das temperaturas dessas estratégias comparando com o caso base se aplicou a análise de sensibilidade local, de modo a identificar a influência de cada uma sobre a edificação. A análise foi realizada em cada zona térmica nos meses de março e junho que contêm a máxima e a mínima temperatura durante o ano.

Na zona térmica 08 (térreo, orientação SO), percebe-se uma maior influência do parâmetro P6 (absortância da cobertura) e do P7 (ventilação) (Figura 4). A mudança da absortância para cores mais claras teve influência principalmente em junho nas temperaturas máximas. Apesar desse parâmetro apresentar um índice de sensibilidade maior no mês de junho (inverno), observando durante todo o ano, ele teve um efeito positivo. A edificação se encontra em um clima quente, logo as cores refletoras melhoram o desempenho da edificação durante a maior parte do ano e é uma indicação para as escolas da região de Joinville. A forte influência desse fator também pode ser vista no trabalho de Almeida (2014).

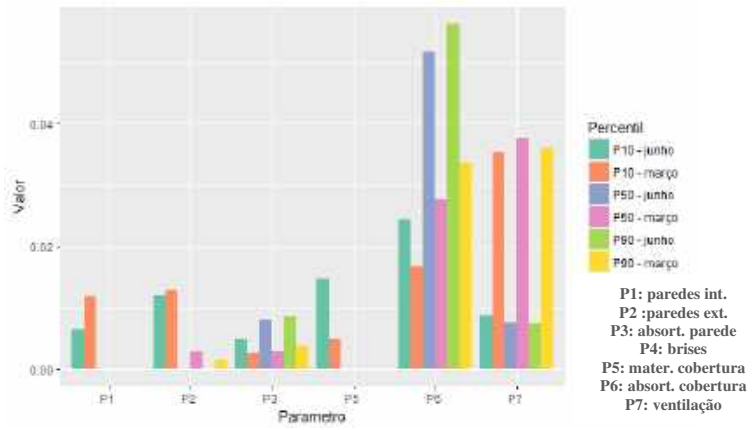


Figura 4 – Análise de sensibilidade zona térmica 08

Outro fator que se destacou nessa zona térmica é a ventilação, item P7, o que vai ao encontro dos trabalhos de Tian e Choudhary (2012) e Yildiz e Arsan (2011) que apresentaram a ventilação natural como um dos fatores mais influentes. Essa foi mais influente nos meses de verão do que inverno, o que demonstra que ela é eficaz em diminuir as temperaturas nos períodos mais quentes. O clima da cidade é quente a maior parte do ano e úmido, logo a ventilação noturna age retirando o calor acumulado durante todo o dia. Mesmo com o controle de temperatura, a ventilação teve um efeito negativo no conforto no inverno, mas a ação durante todo o ano aumentou os índices de conforto.

Os parâmetros P1 (paredes internas), P2 (paredes externas duplas) e P5 (cobertura com lã de vidro) tiveram maior ação nas temperaturas mínimas. P1 e P2 são estratégias parecidas que utilizam de paredes com alta inércia térmica, atuando principalmente contra o frio, logo foi interessante que esses operassem de forma mais intensa nas temperaturas mínimas. P5 é uma cobertura mais isolada, que aumentou o conforto tanto no frio, quanto no calor e o fato de ela agir nas temperaturas nos meses mais frios também é um fator positivo, no entanto percebe-se que por essa zona térmica estar no térreo ela sofre menos a influência do material da cobertura que as zonas térmicas do primeiro pavimento. Essa orientação não apresenta brises. A absortância solar das paredes apesar de constar nos trabalhos de Almeida (2014) e Ferreira, Souza e Assis (2017) como um fator influente, não apresentou grande mudança nesse estudo, pois os valores presentes no caso base eram de 0,44, próximos aos valores da perturbação que é de 0,3. Fato que pode ter ocorrido por a parede estar sombreada pelos beirais existentes na edificação, pelo outro bloco e pela própria orientação solar (sudeste) que não recebe insolação direta boa parte do dia.

Na zona térmica 17 (térreo, orientação SE), os fatores mais influentes também foram P6 (cobertura com α=0,2) e P7 (ventilação), o que pode ser visualizado na figura 5. A ventilação novamente atuou de

forma mais eficaz no verão, principalmente nas temperaturas no mês de março. Esse comportamento também ocorreu nas zonas 21 (orientação SE, 1º andar), 26 (orientação NE, térreo) e 29 (orientação NE, 1º andar) conforme figuras 5 e 6 respectivamente, o que configura a ventilação como uma das principais estratégias bioclimáticas para região, conforme já indica a literatura e a própria norma. A absortância solar da cobertura também agiu de forma expressiva tanto no verão quanto no inverno, destacando-se mais no inverno novamente, apesar dessa estratégia ser própria para o verão e aumentar os índices de conforto anuais.

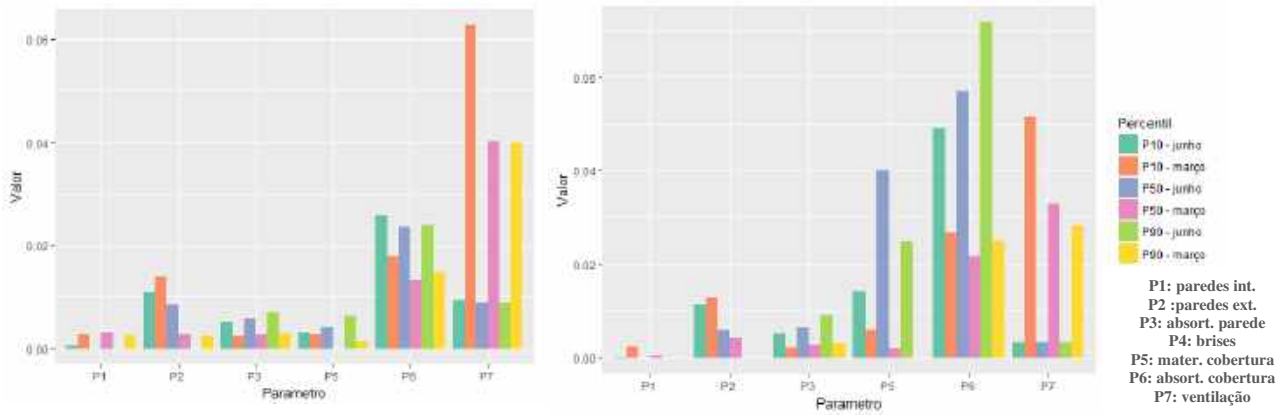


Figura 5 – Análise de sensibilidade zonas térmicas 17 e 21

As paredes internas (P1) mostraram-se pouco relevantes nesse ambiente, sendo que elas são colocadas na literatura como uma estratégia apropriada para o inverno e nesse caso foram ligeiramente mais influentes no verão, ou seja, essa não é uma diretriz essencial para as escolas de Joinville. As paredes externas duplas (P2) com maior inércia térmica influíram mais nas temperaturas mínimas, se configurando como uma estratégia a ser considerada nos dias frios. Possivelmente essa estratégia seja mais eficaz no inverno em edificações que possuam usos noturnos, já que esse seria o período que o calor seria liberado. No verão, ela pode ser benéfica no horário comercial, impedindo a edificação de ganhar calor nos horários de pico devido ao atraso térmico. Nessa orientação também não há brises (P4). O parâmetro P3 (absortância das paredes) e P5 (material da cobertura) possuíram pouca expressividade nessa sala, assim como na zona térmica 8 e nesse caso cabem as mesmas justificativas para esse fato ter ocorrido.

A zona térmica 21 (Figura 5) está no primeiro pavimento acima da zona 17 (orientação SE). Percebeu-se que os elementos referentes à cobertura, P5 (material da cobertura) e P6 (absortância da cobertura), apresentaram maior influência nessa sala, já que essa possui uma envoltória maior e mais exposta às condições climáticas. Sobressaiu-se, nessa sala ainda, a absortância solar da cobertura (P6), com maior influência no mês de junho, nas temperaturas máximas, o que se configura como um fator negativo, visto que a cobertura refletora irá diminuir a temperatura no inverno, no entanto considerando as temperaturas do ano todo, ela ainda é considerada uma estratégia adequada. A cobertura com material isolante (P5) também apresentou maior expressividade nas temperaturas mais frias, com destaque para a mediana, nesse caso, no entanto esse é um fator positivo, visto que a cobertura mais isolante melhora o desempenho da edificação tanto, nas temperaturas mais altas quanto nas mais baixas.

A absortância das paredes externas (P3) apresentou o mesmo comportamento da zona 17, assim como a mudança das paredes externas para paredes duplas (P2). Nesse caso não houve nenhuma perturbação nas temperaturas máximas. As paredes internas (P1) foram inexpressivas nesse ambiente e nos demais que se seguem, o que confirma o que foi analisado no primeiro ambiente de que essa diretriz é prescindível nos ambientes escolares em Joinville.

A zona térmica 26 (térreo, orientação NE, Figura 6), assim como as demais do térreo, apresentou menos influência dos elementos da cobertura. No entanto, a absortância da cobertura (P6) ainda foi um dos elementos mais influentes, principalmente no mês com as temperaturas mais baixas, e nesse caso cabem as análises anteriores a esse item.

Os brises (P4), apesar de constarem como umas das principais estratégias bioclimáticas para climas quentes (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014)**,** foram um dos parâmetros menos influentes nas zonas térmicas com orientação Nordeste, zonas 26, 29. Acredita-se que isso tenha ocorrido porque o caso base já apresentava elementos de proteção solar, como beirais e circulações abertas e pela própria forma da edificação que acaba sombreando essas zonas térmicas. As paredes externas (P2) exercem maior influência no térreo (zona 26) do que no primeiro pavimento (zona 29, Figura 6), o que pode ter ocorrido pelo térreo

não contar com o sombreamento do beiral. Evidenciaram-se as temperaturas mínimas, o que demonstra que ela influiu mais nas temperaturas mais baixas.

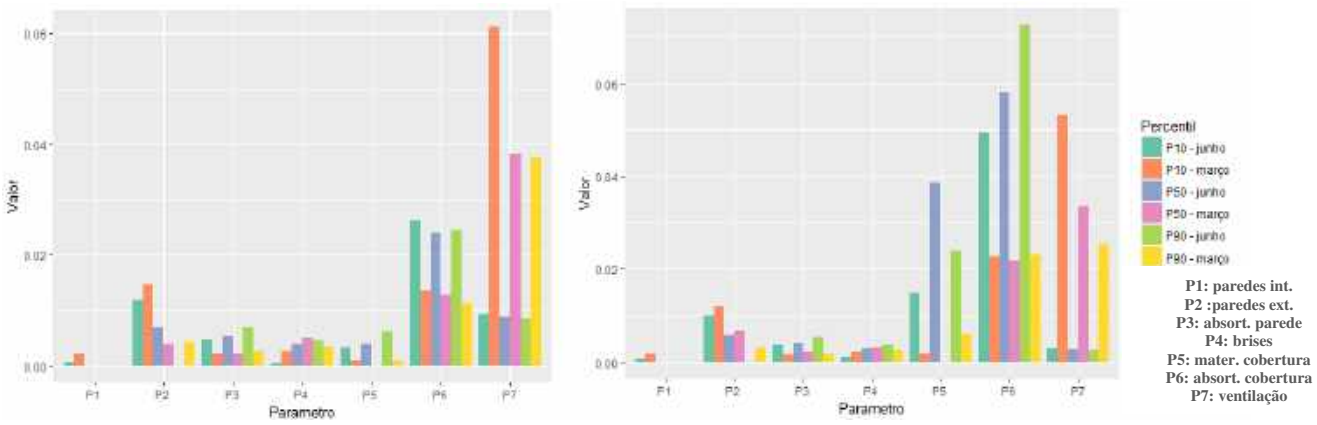


Figura 6 - Análise de sensibilidade zona térmica 26 e 29

Na zona térmica 29 (Figura 6), observou-se uma forte influência no parâmetro 6 (absortância da cobertura) principalmente no mês de junho. Como foi apresentado esse pode ser um fator negativo, sendo que a cobertura com cor mais clara irá diminuir a temperatura da edificação. A cobertura mais isolada (P5) se configurou como um fator relevante, sendo que ela atuou de forma mais intensa também no mês de junho, sendo esse um fator positivo, pois a cobertura mais isolada impede que a edificação perca calor para o meio e se mantenha em uma temperatura maior que a externa.

Na zona térmica 47 (1º andar, orientação NO, Figura 7), observou-se que os brises (P4) têm efeito maior do que nas demais salas, o que deve ter ocorrido por essa ser a fachada mais exposta da edificação, sem sombreamento da própria forma da edificação, com mais horas de insolação durante o ano e por ter a incidência de parte da radiação solar mais quente a da fachada oeste, no período da tarde. Essa zona térmica apresentou um comportamento diferente no parâmetro relacionado aos elementos de proteção solar, possuindo menores índices de conforto do que as outras salas.

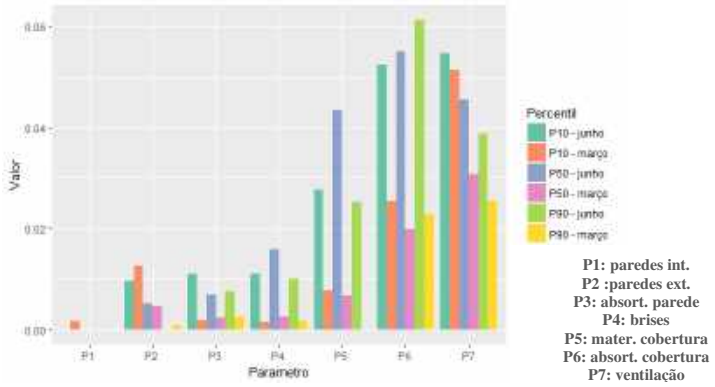


Figura 7 - Análise de sensibilidade Zona térmica 47

Percebeu-se que nessa sala, a ventilação (P7) também teve um comportamento diferente das demais. Por meio do gráfico, observa-se que ela provocou alterações consideráveis em todas as temperaturas, sendo de magnitude maior no mês de junho, em particular nas mínimas. Uma possível explicação é que essa orientação é a que recebe menos ventilação e mais insolação.

Assim, de um modo geral, os parâmetros que exercem maior influência, de acordo com a análise de sensibilidade local, foram a ventilação (P7), a absortância da cobertura (P6) e o material da cobertura (P5).

Esse é um estudo inicial e verifica-se apenas cada parâmetro separadamente. No entanto, fica claro que medidas simples como a mudança da cor da cobertura e a abertura das janelas para ventilação no período noturno tem grande influência no desempenho da edificação e são estratégias simples que devem ser adotadas para melhoria das construções atuais.

5. CONCLUSÕES

A partir do trabalho apresentado, concluiu-se que o objetivo geral deste estudo foi alcançado. A edificação foi simulada e os parâmetros construtivos foram analisados do ponto de vista do conforto térmico e da contribuição para o desempenho da edificação.

Os resultados mostraram que os elementos referentes à cobertura foram influentes, principalmente nos ambientes do primeiro pavimento, como era esperado. Os elementos da cobertura são os mais expostos às condições climáticas, o que pode gerar temperaturas mais desconfortáveis nesses ambientes. De um modo geral, as salas do térreo apresentaram menos desconforto térmico que as do primeiro pavimento. Assim, demonstrou-se à importância do material e da cor da cobertura na forma de serem isolantes e refletoras.

A ventilação é bastante influente e impacta de forma positiva no clima em estudo, que é quente a maior parte do ano. Como o clima é úmido a ventilação noturna auxilia a retirar o calor acumulado na edificação durante todo o dia. Como a estratégia de ventilação 24 horas exige a abertura das janelas em períodos desocupados, recomenda-se o uso de dispositivos mecânicos que possam fazer essa troca de ar, sem que se prejudique a segurança da escola ou exija contratação extra de funcionários.

As paredes internas com alta inércia térmica conforme indica a norma não apresentaram relevância no estudo, acredita-se que isso tenha ocorrido pelo fato de essas não estarem expostas diretamente a insolação. Em relação ao sombreamento, considera-se que o beiral já cumpre a função apropriadamente, pois os brises apresentaram pouca influência nas temperaturas máximas e um pouco mais de influência nas mínimas, mostrando que esses podem estar de alguma forma impedindo o aquecimento da edificação.

Já o material e a cor das paredes externas apresentaram uma influência mediana no estudo, o que pode ter ocorrido pelo fato de as paredes já estarem protegidas da insolação direta.

Assim, esse estudo pode ser uma diretriz em relação aos elementos que as escolas devem investir arquitetonicamente e possuem, de fato um impacto mais efetivo no desempenho da edificação, aumentando a qualidade do ambiente interno e o conforto de estudantes e professores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 15575: Edificações habitacionais de até 5 pavimentos: desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

ALMEIDA, L. S. S. **Influência de parâmetros físicos e geométricos no desempenho termoenergético de habitações unifamiliares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

ANDROUTSOPOULOS, A.V., STAVRAKAKIS, G.M., DAMASIOTIS, M., 2017. Cool Roof Impacts on a School-Building Thermal and Energy Performance in Athens, Greece. **Procedia Environmental Sciences**, 38, 178-186.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **2011 Standard 140-2011. Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs**. Atlanta, 2011.

_____. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ANSI/ASHRAE Standard 55**. Atlanta, 2010.

BRANDAO, D.M.M. da M.T. **Análise de custo benefício de sistemas energéticos em escolas secundárias portuguesas.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente). Universidade de Lisboa, Lisboa, 2009.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016.** Rio de Janeiro: EPE, 2017.

BOGO, A. J. Reflexões críticas quanto as limitações do texto das normas brasileiras de desempenho NBR 15220-3 e NBR 15575. **Holos**, v.7, p.290-298, 2016.

CECHINEL, R. J.; HENNING, E.; HACKENBERG, A. M. Uso do R para comparação de arquivos climáticos: uma análise da aplicação do arquivo climático de Itapoá na cidade de Joinville. *In:* The World of Big Data Analysis, II Seminário Internacional de Estatística com R, 2017, Niterói. **Anais...**Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2017.

DOE – U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus Energy Simulation Software**, 2017. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>. Acesso em: Mar. 2017.

FERREIRA, C. C., SOUZA, H. A. de, ASSIS, E. S. de. Discussão dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos segundo as normas de desempenho térmico brasileiras. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 183- 200, jan./mar. 2017.

FERREIRA, R. J. da S. **Análise de sensibilidade dos parâmetros de cálculo das coberturas jardim**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil- Especialização em Construções). Universidade do Porto, Portugal, 2013.

FONSECA, Ingrid Chagas Leite; ALMEIDA, Carla Cristina da Rosa; LOMARDO, Louise Land Bittencourt; MELLO, Estefânia Neiva. Avaliações de conforto ambiental e eficiência energética do projeto do prédio do Centro de Informações do Cresesb, no Rio de Janeiro. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 41-58, abr./jun. 2010.

GIL-BAEZ, M., PADURA, Á.B., HUELVA, M.M., 2019. Passive actions in the building envelope to enhance sustainability of schools in a Mediterranean climate. **Energy**, 167, 144-158.

GRUNBERG, Paula Regina Mendes. **Avaliação das estratégias bioclimáticas de projeto para clima quente e úmido através de simulação: Estudo de caso de edificação unifamiliar em Joinville-SC.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GRIGOLETTI,G. de C., SATTLER, M. A. Método de avaliação global de desempenho higrotérmico de habitações de interesse social para Porto Alegre – RS – Brasil. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 2, p. 101-114, abr./jun. 2010.

HAMBY, D. M. A review of techniques for parameter sensitivity: analysis of environmental models. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.32. p. 135-154, 1994.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K. **Arquitetura Escolar: o projeto do ambiente de ensino.** São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2011.

LABEEE. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Analysis SOL-AR.** Disponível em: < http://www.labeee.ufsc.br/downloads/softwares/analysis-sol-ar>. Acesso em: mar. de 2017.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 2ª edição. São Paulo: ProLivros, 2014.

LARA, Rigoberto Arambula; PERNIGOTTO, Giovanni; CAPPELLETTI, Francesca; ROMAGNONI, Piercarlo; GASPARELLA, Andrea. Energy audit of schools by means of cluster analysis. **Energy and Buildings**, v.95, p.160–171, 2015.

LOPES, Felipe da Silva Duarte. **Simulação de consumo energético e conforto térmico para edifício de escritórios em Teresina/PI com o uso de estratégias bioclimáticas passivas.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

MAHONEY, C. Climate and house design. **Department of economic and social affairs**. New York. United Nations, 93 p, 1971.

MATOS, Juliana; PEDRINI, Aldomar, TINÔCO, Marcelo; RUCK, Alice. Análise Tipológica De Edifícios Residenciais Verticais A Luz Do RTQ-R. *In*: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2014, Maceió. **Anais**...Maceió: ENTAC, 2014, p.648-656.

PEREIRA, C. D.; GHISI, E. The influence of the envelope on the thermal performance of ventilated and occupied houses. **Energy and buildings**, v. 43, p. 3391-3399, 2011.

PEREIRA, Luísa Dias; RAIMONDO, Daniela; CORGNATI, Stefano Paolo; SILVA, Manuel Gameiro da. Energy consumption in schools - A review paper. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v.40, p-911-922, 2014.

PIANOSI , Francesca; BEVEN, Keith; FREER, Jim; HALL , Jim W.; ROUGIER, Jonathan; STEPHENSON, David B.; WAGENER, Thorsten. Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. **Environmental Modelling & Software**, v. 79, p. 214-232, 2016.

ROSPI, G., et al. 2017. Analysis of the energy performance strategies of school buildings site in the Mediterranean climate: A case study the schools of Matera city. **Energy and Buildings**, 152, 52-60. doi: /10.1016/j.enbuild.2017.07.018.

RORIZ, M. **Correções nas Irradiâncias e Iluminâncias dos arquivos EPW da Base ANTAC**. São Carlos: ANTAC, 2012. Disponível em: <http://roriz.dominiotemporario.com/doc/Correcoes%20nos%20arquivos%20EPW%20-%20ANTAC.pdf>. Acesso em: 08 out. 2016.

TIAN, W.; CHOUDHARY, R. A probabilistic energy model for non-domestic building sectors applied to analysis of school buildings in greater London. **Energy and Buildings**, v.54, p.1-11, 2012.

TIAN, W. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p.411–419, 2013.

TILL, J. E.; MEYER, H. R. **Radiological Assessments: a Textbook on Environmental Dose Assessment.** Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Report No.NUREG/CR-3332, 1983.

YILDIZ, Yusuf; ARSAN, Zeynep Durmuş. Identification of the building parameters that influence heating and cooling energy loads for apartment buildings in hot-humid climates. **Energy**, v.36, p.4287-4296, 2011.