ANÁLISE TERMOENERGÉTICA DE UMA RESIDENCIA UNIFAMILIAR OTIMIZADA APLICADA ÀS ZONAS BIOCLIMÁTICAS 1, 2, 3 E 4

Thaisa Carvalho Rodrigues (1); Thalita dos Santos Maciel (2); Carolina de Mesquita Duarte (3); Eduardo Grala da Cunha (4)

(1) Graduanda de Arquitetura e Urbanismo, thaisa_cr@hotmail.com, Universidade Federal de Pelotas
(2) Mestranda em Arquitetura e Urbanismo, Arquiteta, thalita-maciel@hotmail.com, PROGRAU-UFPel
(3) Mestranda em Arquitetura e Urbanismo, Arquiteta, carolinademesquitaduarte@hotmail.com, PROGRAU-UFPel
(4) Doutor em Arquitetura e Urbanismo, Arquiteto, eduardogralacunha@yahoo.com.br, PROGRAU-UFPel, Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Tecnologia da Construção, Grupo de Estudos em Simulação de Eficiência em Edificações (GES3E), Cx Postal 1359, Pelotas-RS, 96010-020, Tel.: +55 (53) 3284-5508

RESUMO

Este trabalho apresenta um processo de otimização simplificada do desempenho termoenergético de uma edificação unifamiliar, aplicada ao contexto das zonas bioclimáticas ZB1, ZB2, ZB3 e ZB4, através de otimizações simplificadas, quando necessárias para atingir o nível A do RTQ-R e o padrão da normativa Alemã *Passive House*, executadas mediante a variação do isolamento térmico e sombreamento das superfícies translúcidas. O parâmetro inicial trata-se de um envelope baseado no método simplificado da NBR15575. Esta análise foi feita por intermédio de simulação computacional, considerando a ventilação natural e o condicionamento artificial dos ambientes. O estudo também considera a viabilidade econômica dos modelos descritos. Notou-se que a aplicação da *Passive House*, apresentou menor consumo energético nas zonas bioclimáticas 2 e 4, apresentando melhor conforto térmico nas ZBs 1,2 e 3. Sob o aspecto econômico, é notório que a inserção do *Passive House* se torna menos atrativo financeiramente devido ao alto valor de investimento do MVHR, isso implica diretamente no tempo de retorno do investimento, pontuando dessa forma o desafio econômico da aplicação desse padrão ao contexto brasileiro.

Palavras-chave: NBR15575, otimização, desempenho termoenergético, Passive House.

ABSTRACT

This work presents an optimization procedure of the thermoenergetic performance of a single-family house, considering the Brazilian Bioclimatic Zones ZB1, ZB2, ZB3 and ZB4. Through simplified optimizations, when necessary to reach level A of the RTQ-R Regulation and the standard Passive House, it was performed from variation of thermal insulation and shading of translucent surfaces. The initial envelope configuration accorded to NBR15575. This analysis was performed through computer simulation, considering the natural and artificial conditioning environments. The study also considers the economic feasibility of the previous models. Note that the application of the Passive House presents lower energy consumption in bioclimatic zones 2 and 4, presenting better thermal comfort in ZBs 1,2 and 3. From an economic point of view, it is clear that the insertion of the Passive House becomes less attractive financially due to the high investment value of the MVHR, this directly implies the payback time, thus highlighting the economic challenge of applying this standard to the Brazilian context.

Keywords: optimization, thermoenergetic performance, Passive House .

1. INTRODUÇÃO

A demanda global de energia cresce em torno de 1% a cada ano, onde, um terço da energia final gerada é destinada aos edifícios (GSR, 2020). No Brasil, o consumo de energia primária dobrou desde a década de 1990 (IEA, 2020) e atualmente, as construções consomem mais de 52% da energia elétrica gerada no país (EPE, 2020). No cenário pandêmico atual, as medidas de *lockdown* aumentaram significativamente a demanda no setor residencial por eletricidade, isto ocorre devido ao isolamento social, que fez com que as pessoas passassem mais tempo em casa, algumas em atividades *home office*, contribuindo significativamente para o aumento.

Comparado ao ano de 2019, a Europa chegou a alcançar um aumento de 40% da energia consumida no período de 2020 (IEA, 2020) e, no Brasil, estima-se que a demanda de energia elétrica para o setor residencial aumente em até 4,3% ao ano até 2026 (EPE, 2017).

Considerando esse cenário, é fundamental que sejam avaliados novos métodos para a manutenção do nível de conforto térmico das edificações, de forma que o consumo por climatização seja o menor possível, visando a redução desse percentual ao longo dos anos. Quando aplicadas ainda na fase conceitual de um projeto, estratégias de eficiência energética podem ser extremamente eficazes e vantajosas, pois são capazes de reduzir os custos em toda a vida útil do edifício, possibilitando que o investimento inicial seja integralmente compensado (PACHECO *et al.*, 2012). No Brasil, existem algumas normas e regulamentos que estabelecem critérios e índices para desempenho das construções residenciais e, atualmente as principais são: a NBR 15.220 (ABNT, 2005), a NBR 15.575 (ABNT, 2013) e o Regulamento Técnico de Qualidade de edificações Residências (RTQ-R) (INMETRO, 2012). Estas normas são consideradas grandes avanços na esfera da construção civil já que não haviam outros critérios pré-determinados de qualidade da construção. No entanto, a NBR 15.575, que indica parâmetros para a classificação de desempenho, apresenta níveis questionáveis quando se trata de questões de conforto térmico (DALBEM *et al.*, 2017). O RTQ-R propõe parâmetros de maior exigência, que permitem a verificação do desempenho do envelope. Porém, o regulamento não dispõe de diretrizes para aplicação de estratégias passivas visando o desempenho térmico da edificação, apenas o método de análise do nível de eficiência energética.

Nesse enquadramento, o alto custo de energia e maior consciência ambiental levaram a um aumento na construção de casas passivas (MLAKAR, 2011). A *Passive House* é um padrão de edificações desenvolvido na Alemanha e amplamente utilizado na Europa (SCHNIEDERS *et al.,* 2015). Os 5 princípios que baseiam estas construções são: Edificações com alto isolamento térmico, janelas de alta qualidade e ganhos de energia solar, ventilação mecânica com recuperação de calor, envelope hermético e minimização de pontes térmicas. Estudos mostram que estratégias passivas, como o sombreamento durante o dia e a ventilação durante a noite, são capazes de manter as temperaturas internas, fazendo com que os usuários fiquem em conforto térmico (FOKAIDES *et al*., 2016).

MCLEOD (2016) aponta que os indicadores para a certificação de uma *Passive House* são: a) Consumo de energia primária até 120 kWh/(m²a); b) apresentação de teste de pressurização com até 0,6 renovações de ar por hora, c) temperaturas internas acima de 25°C em até 10% das horas do ano. Já para climas quentes, o consumo de refrigeração de até 15kwh/(m²a), apresentar até 1.0 renovação por hora e a temperatura não ultrapassar 10% das horas acima de 26ºC.

Por meio de simulação dinâmica, Schnieders et al. (2015) avaliaram a aplicabilidade do padrão *Passive House* em áreas bioclimáticas como Yekaterinburg, Tóquio, Xangai, Las Vegas, Abu Dhabi e Cingapura. No estudo, os resultados obtidos mostraram que o consumo anual de energia associado à construção de casas passivas é cerca de 75% a 95% inferior ao de edifícios tradicionais com a mesma geometria. O autor também concluiu que o padrão *Passive House* pode ser usado em qualquer lugar do mundo sem afetar a liberdade criativa do arquiteto. Em outro estudo, Badea *et al.* (2014) analisaram o ciclo de vida e o custo de uma Casa Passiva e concluíram que, quando comparada a uma casa padrão, a recuperação do investimento adicional em soluções alternativas e energeticamente eficientes, em um cenário conservador, pode ser alcançado entre 16 e 33 anos, no entanto, quando as previsões mais otimistas das condições econômicas são consideradas, esse cenário muda para algo em torno de 16 e 26 anos.

No Brasil, ainda há pouca informação sobre a aplicabilidade do padrão *Passive House* em estudos para a zona bioclimática brasileira 2 (ZB2). Em Dalbem *et al.* (2016) comprovaram a aplicabilidade do padrão *Passive House* para a ZB2, através da ferramenta *Passive House Planning Pakage* (PHPP) e, posteriormente, Dalbem *et al.* (2017) estudaram o desempenho da envoltória de uma *Passive House*, para a cidade de Pelotas, localizada no estado do Rio Grande do Sul. Neste segundo estudo concluíram mais uma vez a aplicabilidade da norma no clima analisado, no qual, obtiveram uma economia de energia de 56,3% com a utilização de sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor em relação ao uso do condicionador de ar.

2. OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é otimizar o nível de eficiência energética de uma edificação residencial projetada com base no método simplificado da NBR 15575. Para isso, será utilizado o método de simulação computacional através dos critérios de obtenção para a classificação nível A do RTQ-R e do padrão standard *Passive House*, para as Zonas Bioclimáticas 1, 2, 3 e 4. Destaca-se neste estudo a análise do desempenho térmico e energético da edificação e a viabilidade econômica de 3 modelos para as Zonas Bioclimáticas brasileiras frias.

3. MÉTODO

Para cada zona bioclimática em que o projeto foi inserido, o desenvolvimento se deu em três etapas principais com subdivisões que possibilitam a investigação das medidas adotadas. A primeira etapa consiste na definição do caso base, atendendo ao método simplificado da NBR 15575. A segunda etapa representa a otimização do modelo de acordo com a classificação nível A do RTQ-R, e a terceira etapa equivale a otimização do modelo de acordo com as diretrizes do padrão da *Passive House*.

Na primeira etapa as simulações computacionais foram realizadas através do *software Energyplus versão 8.7*, levando em consideração os dados climáticos da região de inserção do modelo, afim de verificar o conforto térmico, o consumo energético, e a análise de viabilidade econômica. A segunda e a terceira etapa foram desenvolvidas com base no modelo definido pela primeira etapa, considerando os mesmos dados climáticos, onde, foram realizadas as alterações do isolamento térmico e sombreamento das áreas envidraçadas quando necessário. Estas etapas visam, respectivamente, a classificação nível A do RTQ-R e o padrão *Passive House*, onde foram analisados os parâmetros de desempenho termoenergético e a viabilidade econômica de ambos os modelos.

3.1. Etapa 1

3.1.1. Definição do objeto de estudo

O projeto arquitetônico foi desenvolvido através da pesquisa "CASA BIOCLIMÁTICA NZEB E QUALIDADE DO LUGAR: Entrelaçando experiências — Portugal e Rio Grande do Sul/Brasil" (DALBEM, 2015), desenvolvido com estratégias passivas para maximização de desempenho, utilizadas no projeto da casa bioclimática de Pouey (2011). O modelo refere-se a uma edificação residencial unifamiliar, distribuída em dois pavimentos e com uma área construída de 126,45m², conforme mostra a Figura 1.

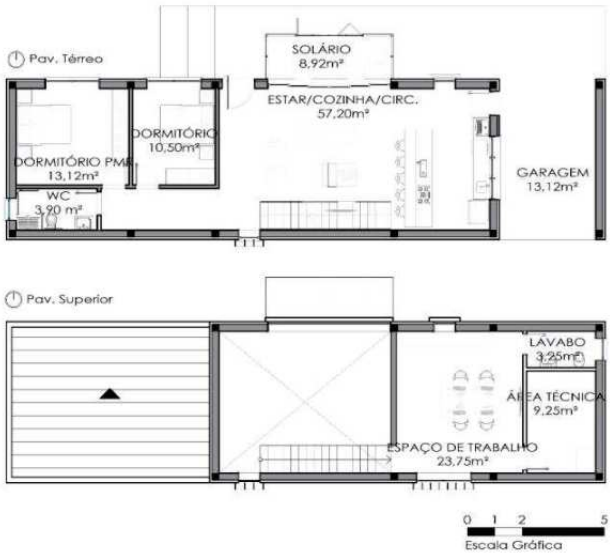


Figura 1 - Planta baixa do térreo e do segundo pavimento.

3.1.2. Envoltório do caso base

O envoltório construtivo segue as recomendações da NBR 15.575. Para o método simplificado desta norma, foram consideradas a condutividade térmica e a capacidade térmica das paredes e coberturas sugeridos para

atendimento mínimo de todas as Zonas Bioclimáticas. A Tabela representa a composição do envoltório e, além disto, todas as esquadrias são de alumínio com vidro insulado duplo.

Tabela 1-Configuração da parede e da cobertura (ABNT, 2005)

	Descrição	U [W/(m².K)]	C_T [kJ/(m².K)]
Parede	Parede de tijolos 8 furos quadrados, assentados na menor dimensão. Dimensões do tijolo: 9,0x19,0x19,0 cm. Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm. Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm.	2,49	158
Cobertura	Laje pré-moldada (vigota e tavela), com concreto e reboco interno. Altura da tavela: 20 cm; concreto: 5,0 cm, reboco interno: 2,0 cm.	1,92	333

3.2. Etapa 2

3.2.1. Otimização simplificada do modelo nível A do RTQ-R

Para obter o nível de eficiência energética A do RTQ-R, foi verificado o nível do caso base, e a seguir o modelo foi ajustado para reduzir o consumo de energia das horas de aquecimento e resfriamento. Os envelopes serão ajustados com isolamento, utilizando EPS nas paredes e no teto. O teste de classificação de envoltórios foi baseado em simulações computacionais, onde o considerou-se o Consumo de Aquecimento (CA), e as Horas de Resfriamento (GHR), de acordo com a classificação de cada zona bioclimática.

3.3. Etapa 3

3.3.1. Otimização simplificada do modelo Passive House

Para atender aos parâmetros da *Passive House*, o modelo de habitação foi otimizado variando o isolamento térmico (EPS) das paredes e da cobertura, aplicando também o sombreamento das áreas envidraçadas, de tal maneira que o consumo por aquecimento e resfriamento fosse inferior a 15 kWh/m² ano. O consumo de energia primária não deve ultrapassar 120kWh/m² ano, a estanqueidade da construção deve chegar a 0,6h-1, e levando em consideração o clima quente, o superaquecimento acima de 26°C não deve ser maior que 10% das horas no ano. Além disto, o sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor (MVHR) também foi considerado, e o modelo foi simulado verificando o consumo de energia e a temperatura interna.

3.4. Simulação no *software EnergyPlus*

As simulações para todos os modelos em todas as etapas levaram em consideração os dados descritos a seguir. O arquivo climático utilizado para a Zona Bioclimática (ZB) 1 foi o da cidade de Curitiba - PR, para a ZB2 o da cidade de Santa Maria - RS, para a ZB3 o da cidade de Florianópolis - SC e para a ZB4 o da cidade de Brasília - DF.

Utilizou-se os dias típicos para as cidades de Curitiba, Santa Maria, Florianópolis e Brasília, obtidos por meio do arquivo *.ddy*, fornecido pelo *site Climate.OneBuilding.Org*. Os dias típicos de inverno e verão utilizados apresentam as frequências de 0,4% e 99,6% de ocorrência. As temperaturas de bulbo seco, mínima e máxima, amplitude térmica, e velocidade média do vento presentes neste dia típico, estão indicados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dia Típico da cidade de Curitiba, Santa Maria, Florianópolis e Brasília,

	ZB1 – CURITIBA - PR		ZB2 – SANTA MARIA - RS		ZB3 – FLORIANÓPOLIS- SC		ZB4 – BRASÍLIA - DF	
Médias	Dia Típico de Verão	Dia Típico de Inverno	Dia Típico de Verão	Dia Típico de Inverno	Dia Típico de Verão	Dia Típico de Inverno	Dia Típico de Verão	Dia Típico de Inverno
Temp. min.[°C]	21,3	11	19,93	4,95	25,7	8,5	20,9	10
Temp.máx.[°C]	31,4	12,3	33,2	12,2	30,8	8,5	31,2	14,8
Amplitude térmica [°C]	10,2	11,6	10,1	9,8	7,9	7,9	12,5	12,2
Velocidade do vento [m/s]	4,6	1,5	2,1	1,7	4,7	1,5	0,1	2,5

De acordo com o Regulamento Técnico da Qualidade, RTQ-R (INMETRO, 2012), para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais, é necessário que seja determinada a temperatura do solo. Neste caso, obtida através do processador *Slab* vinculado ao *software EnergyPlus*, considerando o cálculo da

temperatura média do solo para cada mês do ano com base na média das temperaturas internas e externas do edifício (para o clima selecionado), para as ZBs 1, 2, 3 e 4. A Tabela 3 apresenta a temperatura corrigida do solo sob as condições consideradas para o caso base.

Tabela 3– Temperaturas médias mensais [ºC] do solo.

MÊS (temperatura ºC)												
ZBB	**JAN**	**FEV**	**MAR**	**ABR**	**MAI**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SET**	**OUT**	**NOV**	**DEZ**
1	24,6	24,23	23,47	22,56	20,83	19,76	18,8	18,63	18,6	20,94	22,13	23,11
2	20,4	21,2	20,6	19,7	17,1	15,9	17,3	17,5	16,8	19,0	19,4	22,2
3	24,28	24,4	23,96	23,13	21,31	20,23	19,64	19,64	20,7	21,67	22,73	23,54
4	24,55	23,59	21,79	22,26	21,58	20,67	20,51	20,48	22,01	21,54	21,44	21,44

Os modelos, Caso Base (NBR 15575), otimizado RTQ-R e otimizado *Passive House*, tiveram os parâmetros de iluminação, ocupação e equipamentos configurados com base nas definições do RTQ-R (INMETRO, 2012). A residência foi considerada ocupada no período noturno, com 2 pessoas em cada dormitório e o total de 4 pessoas na sala de estar/cozinha. Para a iluminação considerou-se os ambientes de uso prolongado, utilizando 5 W/m² nos dormitórios e 6 W/m² na sala de estar/cozinha. Já para os equipamentos instalados, utilizou-se 1,5 W/m² de carga instalada para o ambiente de sala de estar/cozinha, durante a ocupação, observando o que preconiza o RTQ-R (2012). O Coeficiente de Performance do sistema de condicionamento de ar (COP) utilizado corresponde a 3,0 para resfriamento e 2,75 para aquecimento.

O objeto de estudo foi simulado em duas condições: ventilado naturalmente e condicionado artificialmente. Naturalmente ventilado, durante 24 horas por dia, para possibilitar a análise de conforto térmico, e durante o período das 8h às 21h, para a classificação dos modelos no RTQ-R, considerando a abertura das janelas quando a temperatura interna estiver acima de 20°C e superior à temperatura externa. O condicionamento de ar foi configurado no modelo *autosize*, considerando os COPs previamente descritos e *setpoints* de 22ºC a 24ºC, com o funcionamento das 21 h às 8 h, para a classificação da envoltória de acordo com as exigências do RTQ-R. Já nas simulações para obtenção de consumo de ar condicionado, foi considerado o funcionamento de 24 horas por dia, com os *setpoints* ajustados para as temperaturas de 20°C e 26°C, afim de seguir as exigências da *Passive House* e também para permitir uma comparação dos dados, tendo todos os modelos com os mesmos parâmetros de condicionamento.

O MVHR (*Mechanical ventilation with heat recovery*) é um sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor. Ele tem como objetivo fazer a renovação de ar, através da extração do ar quente interno e inserção de ar fresco externo nos ambientes (MCLEOD et al., 2016). Favorecendo também o resfriamento, porque o MVHR garante a troca de ar necessária, filtrando grande parte dos poluentes externos, garantindo níveis elevados de qualidade (PALMER, 2020). A configuração do MVHR nos modelos foi feita com o dimensionamento do fluxo de ar (m³/s) para cada ambiente da residência para permitir a renovação de 0,6 trocas de ar por hora.

3.5. Análise de resultados

3.5.1. Desempenho energético

O desempenho energético será obtido através do consumo energético, considerando o sistema de ar condicionado com funcionamento de 24 horas por dia, em kWh/m².ano. Para permitir uma comparação entre os mesmos parâmetros, foram definidos os *setpoints* de 20ºC a 26ºC para os três modelos. Outra análise realizada será a classificação da envoltória conforme o RTQ-R, onde serão analisados o equivalente numérico de aquecimento e o equivalente numérico de resfriamento. A classificação da envoltória para as devidas Zonas Bioclimáticas, conforme o RTQ-R, pode ser encontrada através da Equação 1, referente ao equivalente numérico da envoltória UH para a ZB1, a Equação 2 para ZB2, a Equação 3 para ZB3 e a por fim, a Equação 4, referente ao equivalente numérico para ZB4.

$$EqNumEnv = 0{,}08 \times EqNumEnvResfr + 0{,}92 \times EqNumEnvA \quad \text{Equação 1}$$

$$EqNumEnv = 0{,}44 \times EqNumEnvResfr + 0{,}56 \times EqNumEnvA \quad \text{Equação 2}$$

$$EqNumEnv = 0{,}64 \times EqNumEnvResfr + 0{,}36 \times EqNumEnvA \quad \text{Equação 3}$$

$$EqNumEnv = 0{,}68 \times EqNumEnvResfr + 0{,}32 \times EqNumEnvA \quad \text{Equação 4}$$

Onde:
EqNumEnv é o equivalente numérico da envoltória;
EqNumEnvResfr é o equivalente numérico de resfriamento [GHR];
EqNumEnvA é o equivalente numérico de aquecimento [kWh/ano].

3.5.2 Desempenho térmico

Para a análise do desempenho térmico, foi considerada a ventilação natural 24 horas por dia ao longo do ano. Sendo assim, o modelo adaptativo do ASHRAE Standard 55 (2017) de aceitabilidade de 80% foi utilizado como índice de conforto térmico de acordo com a Equação 5.

$$Toc = 17{,}8 + 0{,}31Text \quad \text{Equação 5}$$

Onde:
T_{oc} = Temperatura operativa de conforto [°C];
T_{ext} = Temperatura média mensal externa [°C].

3.5.3 Análise econômica

Para composição dos custos, primeiramente foi feita a identificação dos serviços necessários, posteriormente levantou-se a quantidade, discriminando os custos diretos e, por fim, foi feita a cotação de preços. Utilizou-se os custos diretos, por terem uma ligação real com os serviços de campo. Sugere-se uma relação de serviços orçamentários, que tem como base os detalhes orçamentários listados na NBR 12.721 (ABNT, 2006). A composição de tarifas e serviços é realizada por meio da base de dados on-line da TCPO - composição de orçamento e relação de preços (TCPO, 2017). Por outro lado, o valor da composição de serviços é obtido pelo SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices), por ser referência oficial de composição de serviços.

Os valores utilizados são provenientes dos relatórios de insumos e composição, que contêm mão de obra, composição e equipamentos dos serviços mais utilizados pelas unidades federais na construção civil. Utilizou-se o relatório da cidade de Porto Alegre (RS) do primeiro semestre de 2018 (CAIXA ENCONÔMICA FEDERAL, 2018). Para os demais serviços (instalações provisórias, equipamentos e instalações metálicas, elétricas e hidráulicas, sanitárias e de gás), é utilizado um valor percentual representativo, com base no custo total da obra, que são recomendados pela Caixa Econômica Federal, onde foi adotado o valor de 0,33% para as instalações provisórias, 3,5% para as fundações especiais, 2,2% para infraestrutura e obras complementares, 4% aparelhos e metais, 8,5% instalações elétricas, 8,5% instalações hidráulicas, sanitárias e 1,5% calafete e limpeza.

Para o sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor (MVHR), devido à inexistência deste produto no Brasil, o orçamento foi feito através do site da empresa *Solarcrest* no Reino Unido. O valor do custo de importação do sistema MVHR é obtido por meio do site da Receita Federal (Ministério da Fazenda, 2021), por meio de simulação de tributação e tratamento tributário e administrativo das importações. O valor utilizado na conversão de Euros (€) para Reais (R$) é igual a R$ 6,7158, que se refere ao dia da simulação, 12 abril de 2021.

O custo com a eletricidade, foi feito através do valor em Reais do consumo, para isto foi necessário o cálculo da tarifa energética, onde foram analisados os valores de COFINS, PIS e ICMS, de 2014 a 2019, possibilitando projetar o aumento de 7,84% ao ano no valor da tarifa energética. Onde, o valor do kWh teve como base a equação disponibilizada pela concessionária CEEE, para o setor residencial de padrão convencional com baixa tensão, desconsiderando o acrescimento das bandeiras tarifárias. Para o tempo de retorno do investimento, utilizou-se o cálculo de *Payback* descontado, onde foi necessária a obtenção dos seguintes dados, na ordem: valor investido, taxa de juros, período, valor futuro e valor presente. O valor investido para otimização foi considerado como saldo negativo, sendo, o valor corrigido de economia de energia elétrica somado mensalmente. Para o cálculo, utilizou-se o valor de consumo corrigido como o valor presente (VP), realizado através da Equação 6, e o valor sem correção como valor futuro (VF). Com a

utilização do software Microsoft Excel, foi possível então, a partir do VP, calcular o *PayBack* descontado, somando o VP ao saldo negativo, até anular o valor de investimento, obtendo assim, o período (em anos) de retorno do investimento.

E para a taxa de juros, considerou-se o Índice Nacional de Custo da Construção (INCC), onde utilizou-se uma média mensal dos últimos 5 anos. O período foi a quantidade de tempo desde o investimento até o retorno do fluxo de caixa. O valor futuro levou em consideração a economia de kWh da otimização comparada com o caso base. Sendo possível obter a economia mensal, considerando as variações no valor da eletricidade. Ocorrendo a variação tarifaria após um ano da data do investimento inicial, tendo o aumento percentual gradativo nos próximos anos.

$$VP = VF \div (1+i)^n \qquad \text{Equação 6}$$

Onde:
VP = Valor presente;
VF= Valor futuro;
I = taxa de juros;
N= número de períodos.

4. RESULTADOS

As Figuras 2 e 3 apresentam, de forma sucinta, os resultados de desempenho térmico, energético, classificação da envoltória, custos e *payback* descontados, obtidos nas análises.

ZONAS BIOCLIMATICAS		ZB1			ZB2		
ENVOLTÓRIAS		CASO BASE NBR 15575	OTIMIZAÇÃO RTQ-R 8cm de EPS nas paredes, cobertura e piso	OTIMIZAÇÃO *Passive house* 8cm de EPS nas paredes e cobertura + 2cm de EPS no piso	CASO BASE NBR 15575	OTIMIZAÇÃO RTQ-R 1cm de EPS nas parede e cobertura	OTIMIZAÇÃO *Passive house* 4cm de EPS nas parede e cobertura + venezianas em todas as janelas
Consumo KWh/m².ano (Climatização artificial 24h)	*Setpoint*	20º-26 ºC	20º-26 ºC	20º-26 ºC	20º-26 ºC	20º-26 ºC	20º-26 ºC
	AQUECIMENTO	19,70	1,30	10,03	17,0	16,54	5,1
	RESFRIAMENTO	2,24	1,05	0,15	17,1	5,84	3,4
	TOTAL	21,95	2,35	10,18	34,1	22,4	8,5
Conforto e desconforto (Ventilação natural 24h)	CONFORTO	53,36%	85,3%	99,01%	63,87%	69,66%	92,01 %
	DESCONFORTO POR FRIO	46,22%	14,68%	0,98%	27,01%	28,89%	7,58 %
	DESCONFORTO POR CALOR	0,42%	0,04%	0,01%	9,13%	1,45%	0,41%
Classificação da envoltória (RTQ-R) (Climatização artificial 21 às 8h)	*Setpoint*	22º-24 ºC	22º-24 ºC	22º-24 ºC	22º-24 ºC	22º-24 ºC	22º-24 ºC
	CLASSIFICAÇÃO	D	A	B	B	A	A
Orçamento	INVESTIMENTO INICIAL (R$)		R$ 20.066,73	R$ 80.124,54	R$ 549.857,58	R$ 552.256,18	R$ 626.179,67
Payback descontado	Tempo de retorno (anos)	-	12 ANOS	52 ANOS	-	3 ANOS	28 ANOS

Figura 2 – Resultados de desempenho termoenergético e viabilidade econômica, para ZB1 e ZB2.

ZONAS BIOCLIMATICAS		ZB3			ZB4		
ENVOLTÓRIAS		CASO BASE NBR 15575	OTIMIZAÇÃO RTQ-R 1cm de EPS nas paredes e cobertura	OTIMIZAÇÃO *Passive house* 1cm de EPS nas paredes e cobertura	CASO BASE NBR 15575	OTIMIZAÇÃO RTQ-R 1cm de EPS nas paredes e cobertura	OTIMIZAÇÃO *Passive house* -
Consumo KWh/m².ano (Climatização artificial 24h)	*Setpoint*	20º-26 ºC	20º-26 ºC	20º-26 ºC	20º-26 ºC	20º-26 ºC	20º-26 ºC
	AQUECIMENTO	10,43	2,68	1,83	13,45	10,42	1,15
	RESFRIAMENTO	6,77	4,49	5,35	8,95	2,67	0,21
	TOTAL	17,20	7,17	7,18	22,4	13,09	1,36
Conforto e desconforto (Ventilação natural 24h)	CONFORTO	71,98 %	77,85 %	83,75%	78,76 %	92,29%	83,78%
	DESCONFORTO POR FRIO	27,29 %	22,13 %	16,25%	20,63%	7,45 %	16,22%
	DESCONFORTO POR CALOR	0,73%	0,02 %	0,00%	0,61%	0,26%	0,00%
Classificação da envoltória (RTQ-R) (Climatização artificial 21 às 8h)	*Setpoint*	22º-24 ºC	22º-24 ºC	22º-24 ºC	22º-24 ºC	22º-24 ºC	22º-24 ºC
	CLASSIFICAÇÃO	B	A	B	B	A	B
Orçamento	INVESTIMENTO INICIAL (R$)	R$ 549.857,58	R$ 552.256,18	R$ 595.672,46	R$ 549.857,58	R$ 552.256,18	R$ 592.771,93
***Payback* descontado**	Tempo de retorno (anos)	-	4 ANOS	35 ANOS	-	4 ANOS	21 ANOS

Figura 3 – Resultados de desempenho termoenergético e viabilidade econômica, para ZB3 e ZB4.

Em relação ao desempenho termoenergético, o padrão *Passive House* apresentou, na maioria das análises, os melhores resultados para as quatro zonas bioclimáticas. A redução no consumo de energia no modelo padrão *Passive House* em relação ao Caso Base foi de, 46%, 75%, 58% e 94% para a ZB1, ZB2, ZB3 e ZB4, respectivamente. O conforto térmico nesse modelo apresentou, para a ZB1, 14% de horas a mais de conforto térmico ao longo do ano em relação ao modelo otimizado para o RTQ-R, e 46% em relação ao Caso Base. Para a ZB2, 22% e 28% e para a ZB3, 6% e 12%. Já para a ZB4 o modelo que se mostrou mais eficiente foi o otimizado para o RTQ-R, apresentando 9% a mais de horas de conforto térmico em relação ao modelo otimizado *Passive House* e 14% em relação ao modelo Caso Base. Apesar da edificação otimizada para o RTQ-R ter classificação nível A, ela apresentou melhor desempenho térmico na ZB4 e energético na ZB1.

Para a obtenção da classificação nível e A do RTQ-R, na ZB1, houve um acréscimo de R$ 20.066,23 em relação ao Caso Base, com a aplicação de 8 cm de EPS nas paredes externas, piso e cobertura. Para o padrão *Passive House*, o acréscimo de 8 cm de EPS nas paredes e na cobertura, 2 cm de EPS no piso e a utilização do sistema MVHR, ocasionou em um custo de R$ 80.124,54 a mais que o Caso Base. O significativo aumento se deve ao custo do sistema de resfriamento, pelo fato do mesmo não ter fabricação nacional. Na ZB2, a otimização do RTQ-R apresentou um acréscimo de R$ 2.398,60, apresentando 1 cm de EPS aplicado nas paredes externas e cobertura. Logo, no otimizado da *Passive House*, com a aplicação de 4 cm de EPS nas paredes e cobertura, com aplicação de venezianas em todas as janelas e a utilização do sistema MVHR, observa-se um aumento de R$ 76.322,11 no orçamento final. Na ZB3, esse aumento foi de R2.398,60, com a aplicação de 1 cm de EPS nas paredes externas e cobertura, para a obtenção da classificação A do RTQ-R e, de R$ 43.814,88, com o acréscimo de 1 cm de EPS nas paredes e cobertura e a utilização do sistema MVHR, para o padrão *Passive House*. E, por fim, na ZB4 o aumento foi de R$ 2.398,60, com a aplicação de 1 cm de EPS nas paredes externas e cobertura para o primeiro caso e, de R$ 42.914,35 apenas para a utilização do sistema MVHR, para o segundo caso. O cálculo para determinar o tempo de retorno do investimento, considerou a economia mensal no consumo de energia, comparando o Caso Base com o otimizado nível A e com o otimizado *Passive House*. O valor obtido foi multiplicado pelo valor do custo do kWh com impostos, gerando o valor de economia monetária mês a mês, considerando um percentual de variabilidade da tarifa de 7,84% ao ano. Com isso, foi possível definir que para a ZB1, o tempo

de retorno é de 12 anos para a otimização que atende ao nível A do RTQ-R e de 52 anos, para edificação otimizada para atender o padrão *Passive House*. Para a ZB2, de 3 e 28 anos, respectivamente. Assim como para as ZB3 e ZB4, que apresentam um tempo de retorno de 4 anos para a otimização que atende ao nível A do RTQ-R e de 35 anos, e 21anos para edificação otimizada atender ao padrão *Passive House*.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo conclui que a implantação do padrão alemão *Passive House* na Zonas Bioclimáticas brasileiras frias pode ser uma boa estratégia para melhoria da qualidade das edificações. De forma geral, quando comparado ao Caso Base, a *Passive House* apresentou melhores resultados para todos os contextos, sendo seu menor índice de redução de cerca de 58% para ZB3 e o apontamento da ZB4 como a zona mais eficiente para este caso. A edificação seguindo o método simplificado da NBR 15575, teve o maior consumo longo do ano, e esteve em conforto térmico por um período menor no ano, comparado com os demais casos. Desta forma, verifica-se que a composição da envoltória e o sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor, são dois fatores que influenciaram muito no desempenho termoenergetico desta edificação. Sob o aspecto econômico, é notório que a inserção do *Passive House* se torna menos atrativo financeiramente devido ao alto valor de investimento do MVHR, isso implica diretamente no tempo de retorno do investimento, pontuando dessa forma o desafio econômico da aplicação desse padrão ao contexto brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220. **Desempenho Térmico para Edificações de Interesse Social**. 2005

____. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575 - 4: 2013**. Edificações Habitacionais** – Desempenho – Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE. 201

____. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12721: 2006. **Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios**. 2006

ASBEA. Associação Brasileira dos Escritórios de Arquitetura. **Guia para Arquitetos na Aplicação da Norma de Desempenho – ABNT NBR 15.575**. 2015. Disponível em: <https://www.caubr.gov.br/wp-content/uploads/2015/09/2_guia_normas_final.pdf>. Acessado em junho, 2019.

ANSI/ASHRAE – AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE / AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. Standard – 55 - 2017 **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, 2017.

BADEA, A; BARACU, T; DINCA, C; TUTICA, D; GRICORE, R; ANASTASIU, M. **A life-cycle cost analysis of the passive house "POLITEHNICA" from Bucharest.** Energy Build. Romênia. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.044>. Acessado em agosto, 2019.

CAIXA ECONOMICA FERDERAL.SINAPI. Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil. Relatório de Insumos e Composições - 1º semestre. 2018. Disponível em: https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_660. Acessado em janeiro, 2018.

CEEE, Companhia Estadual de Energia Elétrica. **Tarifas e Custos dos Serviços 2019**. Disponível em: <http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Archives/Upload/Folder%20Grupo%20B_2019_53766.pdf>

___. Companhia Estadual de Energia Elétrica. **Tarifas e Custos dos Serviços 2014**. Disponível em: <http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/archives/Tabela%20Grupo%20B%20dezembro%202014.pdf

___. Companhia Estadual de Energia Elétrica. **Valores PIS/ CONFIS.** Disponível em: http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Component/BTFormService_PisCofins.aspx

DALBEM, R.; FREITAS, J. M. R.; CUNHA, E. G. Conceito Passivhaus Aplicado ao Clima Brasileiro. Revista de Arquitetura IMED, v. 4, n. 1, p. 26-36, 2015.

DALBEM, Renata; KNOP, Stifany; CUNHA, Eduardo G.; OLIVEIRA, Rui; RODRIGUES, Maria F.; VICENTE, Romeu. **Verification of the Passive House Concept to the South of Brazil Climate. Journal of Civil Engineering and Architecture** (Online), v. 10, p. 937-945, 2016. Disponível em: <http://www.davidpublisher.com/Public/uploads/Contribute/57bfae38cfc38.pdf>. Acessado em agosto, 2019

DALBEM, Renata; CUNHA, Eduardo G.; VICENTE, Romeu; FIGUEIREDO, Antônio J.; SILVA, Antonio César S.B. **Discussão do desempenho da envoltória de uma Passive House adaptada à zona bioclimática 2 em acordo com o RTQ-R.** Ambiente Construído, v. 17, n. 1, p. 201-222,2017.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética.** Nota técnica 030-2018. (14/12/2018). Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/uso-de-ar-condicionado-no-setor-residencial-brasileiro-perspectivas-e-contribuicoes-para-o-avanco-em-eficiencia-energetica>. Acessado em junho, 2019

___. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional de 2020, Ano Base 2019**. MME, 2021 Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acessado em fevereiro, 2021.

___- Empresa de Pesquisa Energética. **Projeção da demanda de energia elétrica,** para os próximos 10 anos (2017-2026). MME,2017. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-261/DEA%20001_2017%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026_VF%5B1%5D.pdf>

FOKAIDES, Paris A.; CHRISTOFOROU, Elias; ILIC, Milos; PAPADOPOULOS, Agis. **Performance of a Passive House under subtropical climatic conditions.** Energy and Buildings. Grécia. 2016.

GSR 2020 - **Global Status Report – Renewables 202**0. Disponível em: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf>. Acessado em: out. 2020.

IEA, International Energy Agency - **Global Energy Review 2020**. Disponível em < https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/electricity#abstract>

INCC, **Índice nacional de custo da construção do mercado.** Fundação Getúlio Vargas. Disponível em: <https://www.portalbrasil.net/incc_di.htm>. Acessado em agosto, 2019.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. RTQ-R. **Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais**. Rio de Janeiro, 2012.

MATTOS, Aldo Dórea. **Como preparar orçamento de obras: dicas para orçamentistas, estudos de caso, exemplos.** Editora PINI. São Paulo, 2006.

MCLEOD, R., MEAD, K., STANDEN, M. **Passivhaus primer: Designer's guide A guide for the design team and local authorities.** 2016. Disponível em <http://www.passivhaus.org.uk/filelibrary/Primers/KN4430_Passivhaus_Designers_Guide_WEB.pdf>. Acessado em agosto, 2020.

MIRANDA, Singoala dos Santos**. A influência da NBR 15575 na prática da arquitetura na cidade de Pelotas, RS**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2014. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1JgPCHhE1ZpyyXsx0OEyxQ-rrlcgAUKa4/view>. Acessado em julho, 2019.

MLAKAR, J.; ŠTRANCAR, J. **Overheating in residential passive house: Solution strategies revealed and confirmed through data analysis and simulations**. Energy and Buildings, v. 43, n. 6, p. 1443–1451, 2011.

SOARES, Maicon Motta. **Avaliação dos Parâmetros de Desempenho Térmico da NBR 15.575/2013: Habitações de Interesse Social na Zona Bioclimática 2**. 2014. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2014. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1RIoBUcDHbTrVKXaZdnl9umWXHh4_qfsn/view>. Acessado em julho, 2019.

PACHECO, R.; ORDÓÑEZ, J.; MARTÍNEZ, G. **Energy efficient design of building: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Espanha. 2012.

PALMER, J. **Passivhaus Trust- The case for MVHR**. Disponível em: <https://passivhaustrust.org.uk/guidance_detail.php?gId=46>. Acessado em agosto,2020.

PASSIVE-ON PROJECT. **A Norma Passivhaus Em Climas Quentes Da Europa: Directrizes De Projecto Para Casas Confortáveis De Baixo Consumo Energético** – Parte 1: Revisão De Casas Confortáveis De Baixo Consumo Energético. 2017. Disponível em: <http://www.eerg.it/passive-on.org >. Acessado em agosto, 2019.

TCPO. Tabela de Composição de Preços para Orçamentos. 15. Ed. São Paulo: Pini, 2017.

POUEY, J. A-A. Projeto de Edificação Residencial Unifamiliar Para a Zona Bioclimática 2 Com Avaliação Termo Energética Por Simulação Computacional. Pelotas, 2011. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2011.

SCHNIEDERS, J.; FEIST, W.; RONGEN, L. **Passive Houses for different climate zones**. Energy and Buildings, v. 105, 71–87, 2015.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFPel e o apoio da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).