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

# AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE ENVOLTÓRIAS COMBINADAS COM SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO

**Julia Fernanda Dos Santos Blasius (1); Aloísio Leoni Schmid (2); Francine Aidie Rossi (3)**
(1) Engenheira civil, Mestranda do PPGECC, juliafblasius@gmail.com
(2) Engenheiro Mecânico, Dr.Ing., Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, iso@ufpr.br
(3) Arquiteta e Urbanista, Dra., Professora do Departamento de Expressão Gráfica, rossi@ufpr.br
Universidade Federal Do Paraná, Setor de Exatas, Departamento de Expressão Gráfica,
Curitiba - PR, 81530-000, Tel.: (41) 3361-3462

## RESUMO
Este trabalho teve como objetivo a avaliação do desempenho termoenergético de três diferentes soluções de envoltória, combinadas a dois diferentes sistemas de climatização, em um edifício com fim educacional na região de Curitiba. As envoltórias variam principalmente em resistência térmica, foram testados o sistema de alvenaria convencional e o sistema construtivo leve. Já os sistemas de climatização testados foram sistema de ar-condicionado *split* e sistema de carga ideal. A partir disso, foram geradas 4 combinações de envoltória e sistema de climatização. A quinta combinação dispensa o sistema de climatização, é exclusiva da terceira solução de envoltória, que conta com um sistema trocador de calor ar -solo acoplado. Um modelo numérico simples foi desenvolvido, a partir da teoria de Fourier para a condução de calor, a fim de estimar a energia necessária para a manutenção da faixa de conforto térmico. Foram considerados os graus-hora de aquecimento e resfriamento, nas temperaturas de base de 18 °C e 24 °C, e observado o período de operação da edificação escolar. Os resultados demonstram a superioridade de desempenho termoenergético dos sistemas de maior resistência térmica, mesmo quando submetidos a equipamentos de eficiência diferentes, a economia é superior tanto em termos absolutos de energia quanto em energia por área, representada pelo EUI (*Energy Use Intensity*). A principal conclusão deste artigo é de que o bom desempenho termoenergético, exaurida a hipótese passiva, é resultado da combinação da envoltória bem projetada e do sistema de climatização eficiente, não sendo recomendável tentar corrigir o mau desempenho da envoltória através, exclusivamente, da implementação de equipamentos de climatização mais eficientes.
Palavras-chave: análise numérica, envoltória, climatização.

## ABSTRACT
This study aimed at the evaluation of the thermal and energy performance of three different envelope solutions, combined with two different air conditioning systems, in an educational building in the Curitiba region. The envelopes vary mainly in thermal resistance. We tested a conventional masonry system and a lightweight system with added thermal insulation. We also tested a split air-conditioning system and an ideal load system. Then, four combinations of these systems were generated. The fifth combination eliminates the climate control system, being exclusive to the third envelope solution, which has an air-ground heat exchanger system coupled to it. A simple numerical model, based on the Fourier Law of thermal conduction, was developed in order to estimate the energy required to maintain the thermal comfort range. Heating and cooling degrees-hours and the base temperatures of 18 °C and 24 °C were considered, also the analyses refer to the specific period of operation of the educational building. The results demonstrate the superiority of thermal and energy performance of higher thermal resistance systems. Even when subjected to different levels of efficiency on equipment, the economy is superior both absolute energy terms and energy per area, represented by the EUI. The main conclusion of this study is that, in order to achieve good thermal and energy performance, one should try a combination of the well-designed envelope and an efficient air conditioning system. Also, it is not recommended to try to correct the poor performance of the envelope through the implementation of more efficient air conditioning equipment alone.
Keywords: numerical analyses, envelope, air conditioning.

## 1. INTRODUÇÃO

A pele está para o corpo, assim como a envoltória está para o edifício, essa é uma das definições de envoltória trazidas no manual para aplicação do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações, o RTQ-C (PROCEL, 2014), e que descreve brevemente a importância da envoltória para a edificação. A eficiência energética e o conforto térmico estão intimamente ligados à solução de envoltória adotada em projeto. Em seu desenvolvimento são essenciais a observação cuidadosa do microclima e a escolha de componentes materiais compatíveis, além das observações próprias do projeto arquitetônico.

O impacto da composição da envoltória sobre o consumo energético é de relação direta, uma vez que a envoltória constitui o elemento principal de separação entre o microclima externo e interno das edificações. A respeito disso, Pirró (2015), afirma que, para que se obtenha um produto de alto desempenho, é preciso além de conhecimento do projetista e da observação dos fatores do entorno, que a envoltória se torne verdadeiro elemento passivo, capaz de controlar ganhos e perdas de calor, quantidade de luz natural e ventilação.

Ainda sobre o estudo de soluções de envoltória, Pirró (2015) ressalta que, muito embora tenham sido feitos avanços, persiste a repetição errática e insistente em modelos vindos de países com condições climáticas muito diferentes das brasileiras, principalmente no contexto da arquitetura comercial. É, de fato, desafiador obter resultados térmicos adequados utilizando o modelo construtivo em vidro, concreto ou alvenaria simples. Apesar disso, nos últimos anos, algumas soluções menos discutidas para a envoltória têm ganhado impulso. Um exemplo é a necessidade de edifícios leves, próprios para a desconstrução, como forma de ampliação do ciclo de vida da edificação, discutida em Rocha, Pereira e Yokoyama (2016), Fischer (2019) e Freitas (2019). Outro tópico refere-se ao uso da madeira, que foi verificado como termicamente adequado para climas brasileiros, a partir da associação com elementos isolantes, em Bogo (2003), Navroski (2010) e Murari et al. (2018). Esses trabalhos apresentam alguns pontos de divergência ao principal modelo construtivo de que se dispõe no Brasil, baseado em alvenaria de blocos cerâmicos e concreto.

No estudo do comportamento termoenergético de edifícios, o foco de pesquisa geralmente está no elemento isolado da edificação, sendo menos avaliados os conjuntos formados por envoltória e sistema de climatização, salvo quando em simulações realizadas em programas computacionais capazes de relacionar ambos sistemas de forma complexa. Os sistemas de climatização, no entanto, desempenham papel relevante no consumo energético de operação dos edifícios. Em particular, o mercado de condicionadores de ar *Split*, equipamento de climatização popular, passa por franca expansão no decorrer das últimas décadas, sendo estimado que 57,2% das residências deverão possuir esse equipamento até 2050 no Brasil (CENTRO CLIMA, 2013). Importante ator do consumo energético em edificações, esses sistemas tem se tornado cada vez mais eficientes, apresentando COPs (Coeficientes de Performance) mais elevados.

É nesse contexto que é proposta a análise de envoltórias neste estudo. A análise é de três soluções para a envoltória de um projeto escolar de autoria de Rosa et al. (2019), utilizados na competição *Solar Decathlon Design Challenge,* uma convencional e outras duas mais inovadoras em termos de materiais e sistemas. O trabalho apresentado surge da necessidade de avaliação objetiva do desempenho dessas envoltórias, em um contexto prático, para fins de desenvolvimento de projeto*,* no qual os métodos oferecidos pelas normativas não se mostraram adequados. Dessa maneira, o método aqui adotado expressa objetividade, e em virtude do seu contexto pouco comum, propõe a análise numérica de três soluções de envoltória associadas a dois diferentes sistemas de climatização. A análise conjunta desses sistemas busca proporcionar o entendimento do papel da eficiência dos equipamentos no contexto energético da edificação. Por fim, como resultado principal da análise, tem-se o indicador energético *Energy Use Intensity* (EUI), que é a intensidade do consumo energético em kWh/m²ano.

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é apresentar uma análise numérica do desempenho termoenergético de três soluções de envoltória na cidade de Piraquara, região metropolitana de Curitiba, considerando dois diferentes sistemas de condicionamento de ar.

## 3. MÉTODO

O método deste trabalho está dividido em três etapas principais:

1. Caracterização do modelo virtual e envoltórias;
2. Definição de modelo numérico para avaliação do desempenho das envoltórias;
3. Análise e comparativo do desempenho térmico e energético dos modelos apresentados.

## 3.1. Caracterização do modelo virtual e envoltórias

O modelo virtual de edificação utilizado, cujo projeto foi tomado nesta análise, é parte do complexo escolar projetado pela equipe[1] da Universidade Federal do Paraná para a competição *Solar Decathlon Design Challenge* 2019. A competição é promovida pelo departamento norte-americano de energia e estimula o desenvolvimento de projetos de edifícios cujo consumo de energia deve atingir zero ou ter valor negativo. Todas as imagens e esquemas do projeto são de autoria de Rosa et al. (2019).

O complexo escolar foi idealizado para implantação na cidade de Piraquara, região metropolitana de Curitiba. Dessa forma, os dados climáticos utilizados referem-se à cidade de Curitiba, bem como a geometria e cargas térmicas analisadas foram extraídos diretamente do projeto citado. Um esquema em planta do complexo é apresentado na Figura . Na imagem citada, o número 1 se refere às salas de aula. O edifício analisado é aquele destacado pelas linhas vermelhas (Figura 1), tais linhas apontam as áreas onde estão as aberturas na fachada, exclusivamente a norte e a sul, o que proporcionou algumas simplificações no modelo de cálculo.




Figura 1 - Planta do complexo escolar, sem escala.

### *3.1.1. Modelo virtual*

O edifício em estudo é um dos blocos didáticos do complexo escolar, conforme sinalizado em vermelho, na planta da Figura 1. Na Figura 2 é apresentada uma perspectiva do mesmo bloco.

Esse é caracterizado pela sua forma retangular e cobertura de duas águas. São 10 metros de largura por 30 metros de comprimento e 8 metros de altura, desde a base até a extremidade do lanternim na cobertura. O edifício é composto de dois pavimentos: o primeiro é destinado a laboratórios e o segundo as salas de aula, são quatro salas de aula em cada pavimento do bloco. A capacidade da sala é de 25 estudantes, e o regime de operação da escola é de 10 horas ao dia, durante 225 dias ao ano.



Figura 2 – Perspectiva do bloco didático.

Apenas um andar é ocupado por vez, de forma que ocupação do edifício é sempre de 50%. A partir da previsão em projeto do regime de operação da escola é definida a carga interna do edifício, apresentada na Tabela 1. Os valores apresentados se referem à ocupação de uma única sala de aula. A taxa de renovação do ar é de 27 m³/h por pessoa e a taxa metabólica em atividade sedentária considerada é de 120 W por pessoa. Dados de iluminação artificial e equipamentos foram estimados a partir do projeto elétrico do complexo escolar.

Tabela1 – Dados gerais de carga térmica por sala.

| **Fonte** | **Carga [W]** |
|---|---|
| Pessoas | 3000,00 |
| Iluminação artificial | 413,40 |
| Equipamentos | 293,01 |
| Renovação do ar | 0,0041 |
| Total | 3706,34 |

[1]Composição da equipe: Professores: Aloísio Leoni Schmid, Maria Regina Leoni Schmid Sarro, Fabíolla Xavier Rocha Ferreira Lima, Márcio Henrique de Sousa Carboni; e alunos: Alexandre Ruiz da Rosa, Flávia Aparecida Oliveira, Julia Fernanda dos Santos Blasius, Luiz Gustavo Grochoski Singeski, Rafael Santos Fischer e Sofia Hinkel Dias.

### *3.1.2. Composição das envoltórias*

Foram definidas três soluções de envoltória para avaliação no projeto. As envoltórias foram escolhidas em função de uma escala progressiva de tecnologia aplicada. O primeiro sistema se refere à alvenaria de vedação convencional, de argamassa de assentamento, blocos cerâmicos e reboco. O segundo sistema é uma proposta de construção leve, com camadas de telha sanduíche, câmara de ar, placas de compensado de madeira e material isolante.

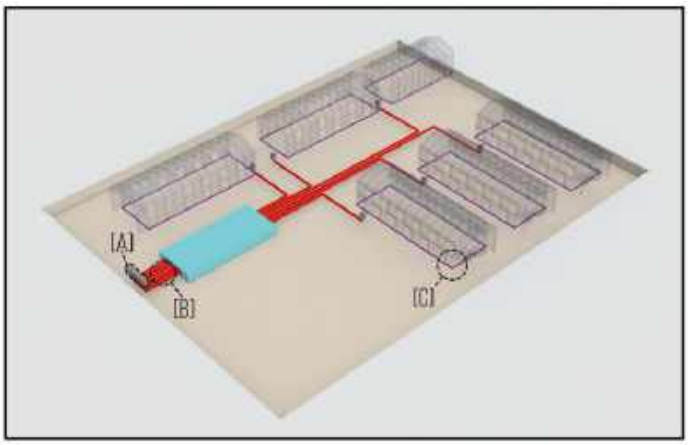


Figura 3 - Esquema do sistema RTC.

Por fim, o terceiro sistema é composto pela mesma estratificação do sistema anterior, adicionado o sistema de capacidade térmica remota (*Remote Thermal Capacity* – RTC) na câmara de ar da parede. Esse sistema, Figura 3, consiste em um trocador de calor que pode ser tipo solo-ar ou solo-água, no qual o ar é tomado [A] e forçado em dutos subterrâneos [B], ajustando-se à temperatura do solo. Após a troca térmica o ar é injetado na cavidade de ar de paredes e cobertura [C]. No projeto estudado, o sistema RTC foi proposto para todas as instalações, como pode ser visto na Figura 3.

Neste trabalho, em virtude de sua extensão e complexidade, não será apresentada a metodologia de cálculo de consumo para a tecnologia RTC, sendo apenas discutidos valores absolutos para comparação com as demais soluções de envoltória propostas no projeto. A composição simplificada de cada sistema é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição das envoltórias.

| **Elemento** | **Envoltória 1** | **Envoltória 2** | **Envoltória 3** |
|---|---|---|---|
| Estrutura | Concreto armado | Madeira | Madeira |
| Cobertura opaca | 1’ | Telha sanduíche + 5 mm de ar + *plywood* + lã de rocha + OSB | Telha sanduíche + RTC + *plywood* + lã de rocha+ OSB |
| Superfície transparente | Vidro simples | Vidro duplo | Vidro duplo |
| Piso | Assoalho de madeira | Assoalho de madeira | Assoalho de madeira |
| Parede opaca | Argamassa + bloco cerâmico + argamassa | Telha sanduíche + 5 mm de ar + *plywood* + lã de rocha+ OSB | Telha sanduíche + RTC + *plywood* + lã de rocha+ OSB |

Nesta pesquisa considera-se *plywood* como compensado ou placa de madeira fina e resistente, que consiste em duas ou mais camadas coladas e pressionadas juntas com a direção da fibra alternando, e *Oriented Strand Board* – OSB como tipo de madeira engenheirada, formada pela adição de adesivos e, em seguida, compressão de camadas de fios de madeira (flocos) em orientações específicas.

### *3.1.3. Propriedades físicas*

Na Tabela 3 encontram-se os materiais e coeficientes de filme (resistência térmica superficial) que compõem as soluções de envoltória estudadas, bem como suas propriedades físicas: condutividade térmica e espessura.

Tabela 3 - Propriedades físicas dos componentes materiais e camadas de ar.

| **Componente** | **Cond. térmica [W/m.K]** | **Espessura [m]** | **Componente** | **Cond. térmica [W/m.K]** | **Espessura [m]** |
|---|---|---|---|---|---|
| Laje de concreto | 1 | 0,120 | OSB | 0,12 | 0,012 |
| Alvenaria de bloco cerâmico | 0,65 | 0,110 | Manta de lã de rocha | 0,03 | 0,050 |
| Telha em fibrocimento | 0,98 | 0,010 | Assoalho de madeira | 0,12 | 0,025 |
| Vidro simples | 1 | 0,005 | Coef. de filme, externo | 25 W/m$^2$K | |
| Vidro duplo (8+8+6) mm | 0,12 | 0,022 | Coef. de filme, externo | 25 W/m$^2$K | |
| Telha sanduíche (Al +EPS+Al) | 0,03 | 0,03 | Coef. de filme, canal | 25 W/m$^2$K | |
| *Plywood* | 0,12 | 0,012 | Coef. de filme, interior | 6 W/m$^2$K | |

Os valores de resistência térmica total (Rt*), que é produto da resistência térmica pela área dos elementos da envoltória, foram calculados conforme o método determinado pela NBR 15220:2 (equações número 4 e 6 da referida norma) e são apresentados na Tabela 4 e na Tabela 5. A Tabela 4 mostra a resistência térmica dos elementos da Envoltória 1, sendo a resistência total da envoltória de 0,0032 K/W. Nas Tabelas 4 e 5, a combinação opaco + opaco se refere a toda a área composta exclusivamente por cobertura opaca e parede opaca (Tabela 2); a combinação opaco + transparente se refere as superfícies opacas que dispõem de aberturas parede opaca e superfície transparente (Tabela 2). É possível observar que os valores de resistência térmica diferem nas Tabelas 4 e 5, pois a parede opaca e a superfície transparente das soluções de envoltória 1 e 2 possuem características térmicas diferentes.

Tabela 4 - Resistência térmica dos elementos: Envoltória 1.

| **Elemento** | **Área [m²]** | **Resistência térmica [m²K/W]** | **Rt* [K/W]** |
|---|---|---|---|
| Telhado | 300,00 | 0,426 | 0,0014 |
| Opaco+opaco | 390,75 | 0,275 | 0,007 |
| Piso | 300,00 | 0,583 | 0,0019 |
| Transparente | 48,00 | 0,170 | 0,0035 |
| Opaco+transparente | 81,25 | 0,170 | 0,0021 |
| Renovação do ar | - | 0,001 | 0,0010 |
| Total | 1120,00 | - | 0,00032 |

A Tabela 5 mostra a resistência térmica dos elementos da Envoltória 2 e 3. A opção por um sistema construtivo leve conduziu à incorporação de materiais isolantes, resultando em resistência total da envoltória de 0,00051 K/W. Enquanto na Envoltória 1 os elementos que compõem parede e cobertura são distintos, nas Envoltórias 2 e 3 a mesma composição é utilizada em ambos, de forma contínua.

Tabela 5 - Resistência térmica dos elementos: Envoltória 2 e 3.

| **Elemento** | **Área (m²)** | **Resistência térmica (m²K/W)** | **Resistência térmica total (K/W)** |
|---|---|---|---|
| Opaco+opaco | 690,75 | 3,112 | 0,0045 |
| Piso | 300,00 | 0,583 | 0,0019 |
| Transparente | 48,00 | 0,263 | 0,0055 |
| Opaco+transparente | 81,25 | 2,793 | 0,0344 |
| Renovação do ar | - | 0,001 | 0,0010 |
| Total | 1120,00 | - | 0,00051 |

Apesar de utilizarem os mesmos elementos, as Envoltórias 2 e 3 diferem no uso da cavidade de ar da parede. Na Envoltória 3, o sistema RTC é adicionado à cavidade de ar na parede e cobertura. Dessa forma, o ar proveniente do sistema, um trocador de calor tipo solo-ar, flui por toda a superfície opaca da edificação.

## 3.2. Definição do modelo numérico

Para o cálculo de energia dispendida na manutenção do conforto térmico, foi desenvolvido um modelo para estimar o consumo de energia (Q), considerando estado estacionário e uma única zona. O modelo, bastante simplificado, considera apenas a condução como mecanismo de transferência de calor, utilizando para isso a Teoria de Fourier. Tal teoria considera apenas a diferença de temperaturas, ou demanda de energia, e a resistência térmica de uma superfície. Dessa maneira, o modelo foi adaptado utilizando como demanda de energia os dados de graus-hora (DD) e a resistência térmica total (Rt*) gerada pelas envoltórias em análise. Métodos similares são encontrados nos levantamentos de Mao, Haberl e Baltazar (2013) e no trabalho de Aznar et al. (2018). O modelo desenvolvido, considera a demanda térmica (DD), a resistência oferecida (Rt*) e o balanço proporcionado pela taxa de calor (q) produzida internamente no tempo (t) analisado, conforme demonstra a Equação 1. Há ainda a aplicação do fator de segurança (FS), que considera possibilidade de concentração da carga térmica em períodos curtos comprometendo o raciocínio em graus-hora.

$$Q = DD/Rt^* + (qt)/FS \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:
Q é o consumo de energia [kWh/ano];
DD é a quantidade de graus-hora de aquecimento ou resfriamento [°Ch];
Rt* é a resistência térmica do elemento [°C/W];
q é a taxa de produção de calor [W], afetada de sinal algébrico negativo no caso de aquecimento;
t é o tempo decorrido [s];
FS é o fator de segurança para concentração de carga.

Considerando os COPs de cada sistema de climatização, a energia anual requerida (Er) para aquecimento ou resfriamento é dada pela Equação 2:

$$\mathrm{Er} = \mathrm{Q}/COP \qquad \text{Equação 2}$$

Onde:
Er é a energia anual requerida [kWh/ano]
Q é energia [kWh/ano];
COP é o coeficiente de performance do sistema de condicionamento de ar.

Os dados de graus-hora foram obtidos de dados climáticos da cidade de Curitiba, compilados por Goulart, Lamberts e Firmino (1998), cabe ressaltar que o arquivo TRY (*Test Reference Year*) obtido é para o ano de 1969, fator que pode influenciar nos resultados obtidos. O ponto de coleta de dados, localizado na região do aeroporto Afonso Pena, também exerce influência sobre a amostra. Para graus-hora de aquecimento, a temperatura de base ($Tb_a$) utilizada foi de 18 °C. Para o resfriamento, a temperatura de base ($Tb_r$) foi de 24 °C.

Além disso, algumas considerações foram feitas em virtude do projeto educacional dos blocos escolares. O período de operação escolar é das 8 às 18 horas, de segunda a sexta. Assim, foram consideradas 10 horas de operação ininterruptas. Observando a demanda específica do edifício, foram desprezadas em totalidade as horas que ocorreram no período em que a escola se encontra fechada. Dessa forma, foram analisadas apenas as horas do intervalo das 8 às 18 horas, durante os 225 dias estimados para a operação do complexo.

Na alimentação da Equação , a resistência térmica (Rt*) dos elementos é aquela apresentada nas Tabelas 4 e Tabela 5. A taxa de produção de calor (q) e o tempo (t) decorrido são dependentes do projeto estudado, refletindo o período de operação escolar. O valor da carga térmica para uma sala é apresentado na Tabela 1. No modelo desenvolvido, algumas simplificações foram feitas a fim de tornar esta análise tão prática quanto possível. Nesse sentido, o modelo a que se refere a Equação 1 observa unicamente a transferência de calor por condução, conforme a teoria de Fourier, e a parcela de calor gerada internamente (Tabela 1). Em razão disso, o parâmetro estudado é o de resistência térmica. Dessa forma, se tratando de envoltórias de composição leve e de acabamento em pintura de cor branca, não foram considerados a capacidade térmica, os revestimentos e a absortância solar. O efeito da radiação também não é considerado, em função da distribuição das aberturas na orientação solar, que se deu apenas nas direções norte e sul, conforme indicado em destaque vermelho na Figura 1. Além disso, o projeto contou com prateleiras de luz nas janelas, prevenindo o interior do edifício de receber radiação diretamente.

## 3.3. Análise do desempenho térmico e energético

### *3.3.1. Sistemas de climatização*

Para a análise de desempenho térmico e energético foram considerados duas possíveis configurações para os sistemas de climatização:

1. Sistema de ar-condicionado *split*
2. Sistema climatizador de carga ideal

O coeficiente de performance varia entre os sistemas. A Tabela 6 apresenta de forma resumida as configurações consideradas:

Tabela 6 – Sistemas de condicionamento de ar.

| **Sistema** | **COP resfriamento** | **COP aquecimento** |
|---|---|---|
| *Split* | 3,5 | 4,5 |
| Carga ideal | 1 | 4,5 |
| RTC | * | * |

*não há valores pré-definidos de COPs para o RTC, devendo o correspondente efeito térmico ser dividido pelo consumo de energia dos ventiladores após seu o dimensionamento.

Nesse caso, o desempenho é medido através do consumo de energia necessário ao funcionamento do equipamento vinculado a tecnologia RTC, isto é, a energia utilizada pelos ventiladores do sistema. A Figura 4 traz um resumo esquemático da análise proposta. Todas as soluções são avaliadas em função da energia gasta para a manutenção da faixa de conforto térmico, compreendida entre $Tb_a$ e $Tb_r$, viabilizando a comparação dos resultados.



Figura 4 - Esquema ilustrativo da análise.

### *3.3.2. Energy Use Intensity*

O indicador é definido como a razão entre a energia requerida (Er) para a manutenção do conforto no período de um ano e área total edificada (Atotal), de 600 m², gerando o EUI (Equação 3):

$$EUI = Er/Atotal \quad \text{Equação 3}$$

## 4. RESULTADOS

São apresentados a seguir os resultados obtidos. A análise foi iniciada pela estimativa das cargas internas de uma única sala de aula, considerando o período de funcionamento da escola, e a ocupação simultânea de quatro salas do bloco. O valor para carga interna de cada sala foi estimado em 952 W, com o total de quatro salas somam-se 3.808 W. Esse valor foi observado no modelo numérico como taxa de produção de calor (q).

As soluções de envoltória 1 e 2, alvenaria e construção leve, foram associadas a dois tipos de sistema de condicionamento de ar: sistema de ar-condicionado *split* e sistema de carga ideal. Na sequência são apresentados os resultados obtidos.

### 4.1. Sistema de ar-condicionado *split*

Conforme descrito no item 3.2, foram conduzidas análises para as envoltórias 1 e 2 em dois cenários. Dois equipamentos foram considerados para a manutenção da faixa de conforto térmico. O primeiro se refere à utilização de ar-condicionado *split*, cujo COP para resfriamento é de 3,5 e para aquecimento 4,5. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados para sistema *split*: Envoltória 1 e Envoltória 2.

| **Item** | **Envoltória 1** | **Envoltória 2** |
|---|---|---|
| Rt* total, em K/W | 0,0002 | 0,0005 |
| Carga térmica (sala), em W | 952,00 | 952,00 |
| Carga térmica (total), em W | 3808,00 | 3808,00 |
| Fator de segurança | 4 | 4 |
| Graus-hora aquecimento, em h | 6498,00 | 6498,00 |
| COP aquecimento | 4,5 | 4,5 |
| Er aquecimento, em kWh/ano | 3975,00 | 877,30 |
| Graus-hora resfriamento, em h | 1041,04 | 1041,04 |
| COP resfriamento | 3,5 | 3,5 |
| Er resfriamento, em kWh/ano | 10731,10 | 10093,05 |
| Er total (aquec+resfr), em kWh/ano | 14705,74 | 10970,35 |
| Iluminação e equipamentos, em kWh/ano | 12714,00 | 12714,00 |
| Consumo anual, em kWh/ano | 27419,74 | 23684,35 |

Os graus-hora de aquecimento foram de 6.498 °C.h, valor corrigido em função do período de atividade da escola. Os graus-hora de resfriamento foram de 1.940 °C.h, também de acordo com o período de atividade escolar. Esses valores foram observados no modelo numérico como graus-hora (DD). Para o cálculo do consumo anual de energia, a parcela referente a iluminação artificial e equipamentos foi estimada

pelos valores da Tabela 1, multiplicados pelo período (10 h/dia e 225 dias/ano), resultando em 12.714 kWh/ano. Esse valor foi aplicado em todas as situações simuladas.

Avaliando os resultados da Envoltória 1, a redução significativa de graus-hora de aquecimento, em função do horário de operação da escola, resulta em proporcional diminuição de energia requerida para aquecimento. Como a escola estará fechada nas horas mais frias do dia, e aberta nas horas em que ocorrem picos de máximas, o gasto de energia para resfriamento é aproximadamente 2,7 vezes superior à parcela gasta para aquecimento.

Para a Envoltória 2, a redução se mostra ainda mais significativa quando comparados os valores necessários para aquecimento e resfriamento. A energia requerida para aquecimento é da ordem de 12 vezes inferior à de resfriamento. É evidente que o valor inferior do COP, inerente aos processos de máquinas de resfriamento, também exerce influência sobre o resultado. Reforça-se, entretanto, que estes valores refletem o intervalo horário estudado. O comportamento climático da região da cidade de Curitiba é normalmente de alta demanda por aquecimento, quando consideradas todas as horas do dia (ROSSI; DUMKE; KRÜGER, 2009).

Quando comparadas as duas soluções, a Envoltória 2, tipo construção leve, teve melhor desempenho térmico de aquecimento, com energia requerida inferior à da Envoltória 1, tipo alvenaria convencional. O mesmo acontece no desempenho térmico de resfriamento, porém, com diferença menos significativa. Estes resultados vão ao encontro de resultados de pesquisas já realizadas, nas quais é demonstrado que o desempenho térmico e energético de edificações leves pode ser adequado e até superior ao de alvenaria convencional (MURARI et al., 2018). No exemplo deste estudo, a solução em construção leve conseguiu uma economia de aproximadamente 3.735 kWh/ano em relação a solução em alvenaria convencional, considerando um sistema *split* de ar-condicionado.

## 4.2. Sistema de carga ideal

A eficiência dos equipamentos utilizados para climatização é fator relevante no consumo energético das edificações. Nesse sentido, as envoltórias 1 e 2 foram avaliadas a partir da utilização de equipamento de carga ideal, menos eficientes que o sistema *split*. Neste sistema o COP de resfriamento foi considerado ideal, ou seja, 100% de eficiência. Na Tabela 8 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 8 - Resultados para sistema carga ideal: Envoltória 1 e Envoltória 2.

| **Item** | **Envoltória 1** | **Envoltória 2** |
|---|---|---|
| Rt* total, em K/W | 0,0002 | 0,0005 |
| Carga térmica (total), em W | 3808,00 | 3808,00 |
| Fator de segurança | 4 | 4 |
| Graus-hora aquecimento, em h | 6498,00 | 6498,00 |
| COP aquecimento | 4,5 | 4,5 |
| Er aquecimento, em kWh/ano | 3975,00 | 877,30 |
| Graus-hora resfriamento, em h | 1041,04 | 1041,04 |
| COP resfriamento | 3,5 | 3,5 |
| Er resfriamento, em kWh/ano | 37912,37 | 35359,58 |
| Er total (aquec+resfr), em kWh/ano | 41887,01 | 36283,93 |
| Iluminação e equipamentos, em kWh/ano | 12714,00 | 12714,00 |
| Consumo anual, em kWh/ano | 54601,01 | 48950,88 |

A partir dos resultados apresentados na Tabela 8, nota-se o impacto da utilização de equipamento de eficiência inferior, as duas soluções de envoltória apresentaram valores superiores de consumo de energia para resfriamento. Nesse caso, a diferença de desempenho entre as envoltórias avaliadas fica mais evidente. A Envoltória 1 tem consumo superior de aproximadamente 5.650 kWh/ano, em relação a Envoltória 2, para a manutenção da faixa de conforto térmico com equipamento de carga ideal. Nota-se que ao diminuir a eficiência do equipamento, a resistência térmica (Rt*) do conjunto se torna mais relevante, fazendo crescer a diferença entre o desempenho da Envoltória 2 em relação à Envoltória 1.

### 4.3. Sistema RTC

O sistema RTC, considerado em associação com a Envoltória 3, consiste em um trocador de calor tipo solo-ar, cujo fluxo de ar é injetado por propulsão de ventiladores na cavidade de ar das paredes e cobertura. Este sistema faz com que parcela preponderante da área do envelope, considerada da cavidade para dentro, esteja sujeita a um clima ameno (temperaturas oscilando com amplitude 2,5˚C ao redor da média anual da temperatura superficial, em torno de 16˚C) consumindo somente energia elétrica para acionamento dos ventiladores de modo a manter, dentro das cavidades, temperatura do ar aproximadamente constante. O resultado é o consumo de energia de 9.788 kWh/ano para o funcionamento dos ventiladores em oposição ao consumo gerado pelos condicionadores de ar *split* e carga ideal.

Entre as soluções analisadas, a Envoltória 3 apresentou o menor valor de demanda de energia para climatização (Er), e por consequência, a menor estimativa de consumo anual, seguida da Envoltória 2, no sistema *split.* Isso se dá pela tecnologia de que é constituída a envoltória, que além de possuir estrutura leve e isolante, está associada ao sistema RTC, que permite a manutenção da faixa de conforto térmico com consumo de energia inferior ao do ar-condicionado *split*, já considerado na análise como muito eficiente (COP de 3,5 para resfriamento).

### 4.4. Análise de intensidade do uso de energia: EUI

O indicador EUI é representativo da intensidade de uso de energia por área, mais comum no exterior, ele é utilizado em manuais e análises práticas em função da sua objetividade. O presente estudo, elaborado no contexto de uma competição internacional, fez uso deste indicador para avaliação do desempenho termoenergético de envoltórias, o resultado é apresentado na Figura 5.

Ao comparar o desempenho das soluções de envoltória, fica claro que o sistema construtivo leve (Envoltória 2 e Envoltória 3), que conta com camada isolante, oferece o melhor desempenho térmico do grupo, resultando em demanda energética inferior para climatização (Er), independentemente do valor do COP do equipamento. O melhor desempenho termoenergético vem, portanto, da tecnologia aplicada na envoltória associada a um equipamento de climatização eficiente. Os resultados obtidos para nas envoltórias tipo E2 – S e E3 demonstram esse efeito.

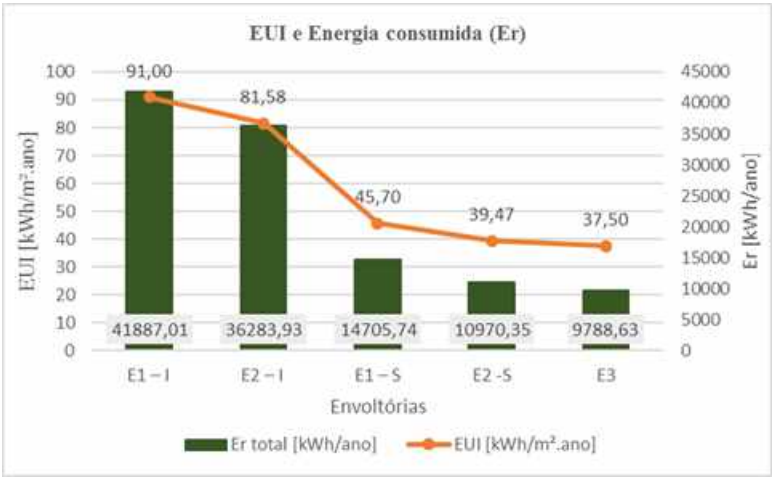


Figura 5 – Gráfico EUI e Energia consumida (Er).

Onde:
E1 – I: envoltória 1 – carga ideal; E2 – I: envoltória 2 – carga ideal; E1 – S: envoltória 1 – *split*; E2 – S: envoltória 2 – *split*; E3: envoltória 3 – RTC.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise termoenergética a partir da combinação de três tipos de soluções de envoltória e dois tipos de sistema de climatização. Em relação ao desempenho energético das envoltórias, a Envoltória 1, representativa da construção convencional de alvenaria obteve os resultados menos econômicos do grupo. Como esperado, a combinação de alvenaria simples, de baixa resistência térmica, apresentou resultados de consumo altos. A utilização de equipamento de maior eficiência (ar-condicionado *split*) conduziu a melhores resultados, o EUI foi reduzindo de 91 a 45,70 kWh/m².ano, mas não foi suficiente para igualar a Envoltória 1 ao desempenho da Envoltória 2 e Envoltória 3. Isso demonstra que, uma vez construída em técnica pobre, de baixa resistência térmica, o envelope vai apresentar desempenho comprometido mesmo que sejam instalados equipamentos de climatização muito eficientes.

As demais envoltórias, Envoltória 2 e Envoltória 3, apresentaram valores mais econômicos para o consumo energético, com respectivos EUIs de até 39,47 e 37,50 kWh/m².ano. Nesse caso, o material usado para o fechamento opaco foram telhas tipo sanduíche e demais elementos isolantes, uma proposta de construção leve, porém de resistência térmica superior àquela da Envoltória 1. Assim sendo, o

comportamento esperado foi atingido e a resistência térmica superior associada ao equipamento mais eficiente gerou o melhor resultado em consumo em ES-2 e E-3. Novamente, a eficiência do equipamento é reforçada pela solução desenvolvida no invólucro.

O sistema avaliado na Envoltória 3 é, na verdade, de complexidade superior aos demais pois trata de um sistema trocador de calor acoplado, que confere ao edifício um comportamento térmico particular, de maior estabilidade. Nesse contexto, a Envoltória 3 foi avaliada como de grande potencial termoenergético, em vista de seu consumo energético reduzido, e aplicabilidade na região estudada. O projeto em estudo, optou pela adoção da Envoltória 3 em função do desempenho termoenergético constatado nesta análise. Cabe ressaltar, no entanto, a necessidade de avaliação dos aspectos financeiros e técnicos, a fim de verificar a viabilidade desse sistema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.

AZNAR, F., ECHARRI, V., RIZO, C., RIZO, R. Modelling the thermal behaviour of a building facade using deep learning. **PLOS ONE** 13(12): e0207616. https://doi.org/10.1371/journal. pone.0207616. 2018.

BOGO, A.J. **Avaliação de desempenho térmico de sistemas construtivos de paredes em madeira em habitações.** In: Encontro nacional de conforto em ambientes construídos, 2003, Curitiba.

CENTRO CLIMA. Emissão de Gases de Efeito Estufa – 2050: Implicações Econômicas e Sociais do Cenário de Plano Governamental. Relatório técnico. Rio de Janeiro, RJ. 2013.

FISCHER, R.S. **A adaptabilidade e desempenho energético na habitação de interesse social: implicações no desempenho energético causadas pela adoção de estratégias de adaptabilidade no projeto de uma nova HIS**. Dissertação de Mestrado, UFPR, Curitiba, 2019.

FREITAS, L. S. **Vida útil ótima de projeto de edificações considerando consumo energético de construção e operação, sob a ótica do ecodesign**. Dissertação de Mestrado, UFPR, Curitiba, 2019.

GOULART, S.V.G., LAMBERTS, R., FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras** – 2. Ed. – Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998. 345 p.

MAO, C., HABERL, J.S., BALTAZAR, J.C. **Peak heating/cooling load design methods: How we got to where we are today in the U.S.** In: International IBPSA Building Simulation Conference. 2013. Proceedings… Chambéry, France. 2013.

MURARI, A.; BALDAN, V.; STAMATO, G.; PABLOS, J.; SICHIERI, E. **Avaliação de desempenho térmico de uma habitação unifamiliar em *wood frame* na cidade de São Carlos-SP**. Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira e Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira, Brasil, mar. 2018.

NAVROSKI, M.C.; LIPPERT, D.B.; CAMARGO, L.; PEREIRA, M. O.DE; HASELEIN, C.R. Avaliação do isolamento térmico de três diferentes materiais usados na construção e preenchimento de paredes externas. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 01, n. 01, p. 41-51, maio de 2010.

PIRRÓ, L. Análise da envoltória como estratégia para a sustentabilidade dos edifícios. **Belas Artes**, São Paulo, 2015. Disponível em: http://www.belasartes.br/revistabelasartes/downloads/artigos/14/analise-da-envoltoria-como-estrategia-para-a-sustentabilidade-dos-edificios.pdf. Acesso em: 10/04/2019.

PROCEL - Manual de Aplicação do RTQ-C. Disponível em: http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/m anualv02_1.pdf. Acesso em 10/04/2019.

ROCHA, F.N.A., PEREIRA, G.B., YOKOYAMA, N.O. **Análise de viabilidade técnica do sistema wood frame na construção de unidades unifamiliares no Brasil**. XX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VI Encontro de Iniciação à Docência – Universidade do Vale do Paraíba, 2016.

ROSSI, F. A.; DUMKE, E.; KRÜGER, E. L. **Atualização do Ano Climático de Referência para Curitiba**. In: X Encontro nacional de conforto em ambientes construídos, 2009, Natal

ROSA, A.RUIZ; CARBONI, M.H.S.; FISCHER, R.S.; SARRO, M.R.L.S.; LIMA, F. X. R.F.; BLASIUS, J.F.S.; SINGESKI, L.G.G.; DIAS, S.F.; SILVEIRA, F.A.; SCHMID, A.L. Projeto de escola apresentado ao *Solar Decathlon Design Challenge*, 2019.


## AGRADECIMENTOS


Agradecimentos ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná e à Capes/CNPQ pelos recursos financeiros aplicados no financiamento do projeto de pesquisa.