

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS

PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA - PROPAR

**Avaliação do consumo de energia
em etapas iniciais do projeto:
um estudo associando interfaces físicas e digitais
como elemento qualificador do processo projetual**

Virgínia Czarnobay Vannini

Porto Alegre, 2018

**Avaliação do consumo de energia
em etapas iniciais do projeto:
um estudo associando interfaces físicas e digitais
como elemento qualificador do processo projetual**

Virgínia Czarnobay Vannini
autora

Tese de doutoramento apresentada ao Programa de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito para a obtenção do grau de Doutor em Arquitetura.

Prof. Dr. Benamy Turkienicz
orientador

Porto Alegre, 2018

CIP - Catalogação na Publicação

Vannini, Virgínia Czarnobay
Avaliação do consumo de energia em etapas iniciais
do projeto: um estudo associando interfaces físicas e
digitais como elemento qualificador do processo
projetual / Virgínia Czarnobay Vannini. -- 2018.
260 f.
Orientador: Benamy Turkienicz.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Faculdade de Arquitetura, Programa de
Pós-Graduação em Arquitetura, Porto Alegre, BR-RS,
2018.

1. Desempenho. 2. Etapas Iniciais de Projeto. 3.
Aprendizagem. 4. Processo de Projeto. 5. Consumo de
energia. I. Turkienicz, Benamy, orient. II. Título.

Ao meu pai, arquiteto Ronaldo Severino Vannini, por mostrar a técnica e a beleza que envolve a Arquitetura; a minha mãe, Nadiérge Czarnobay Vannini, pelos ensinamentos e valores; ao meu marido, Thiago Zanini pela paciência e amor incondicional e a minha filha Helena por mostrar o verdadeiro sentido da vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Benamy Turkienicz, pelo empenho, ensinamentos dedicados ao longo desses anos de pesquisa e busca pelo conhecimento científico; e pela oportunidade de aprendizado e crescimento acadêmico e profissional.

A toda minha família, em especial aos meus pais, Nadiérge e Ronaldo Vannini pelo incentivo incondicional a mim dedicado durante a realização deste trabalho; e ao meu marido Thiago Zanini pelo amor e companheirismo, sem eles eu nada seria.

Ao professor Paulo Beyer, pela orientação com o software *EnergyPlus* e pelas contribuições em discussões a respeito do consumo energético e condicionamento do ar.

A todos os bolsistas de iniciação científica do SIMMLAB – Laboratório para Simulação e Modelagem em Arquitetura e Urbanismo – e em especial, ao Matheus Cipolatt, pelo auxílio e empenho com as atividades computacionais.

À minha amiga, arquiteta e professora Dra. Alessandra Teribele, pelo apoio e valiosas discussões a respeito do conhecimento científico.

À Claudia e Beatriz Czarnobay pelo carinho com que me acolheram em vossa casa, sempre contribuindo com palavras de motivação e amor.

À engenheira civil Vanessa Pasinato pela recepção calorosa em Porto Alegre e pelo afeto e companheirismo ao longo dos últimos semestres do doutorado.

Aos colegas da pós-graduação, colaboradores e membros do SIMMLAB pela troca de experiências e conhecimento ao longo dos últimos anos de doutorado.

A todos os alunos da graduação da UFRGS, que contribuíram com a pesquisa, dispondo de tempo e dedicação, durante os exercícios práticos, propostos na fase experimental da pesquisa.

RESUMO

Modelos físicos possibilitam a manipulação rápida e intuitiva da forma na fase de concepção e exploração do envoltório edificado. Por outro lado, modelos digitais de desempenho oferecem resultados quantitativos que podem contribuir com a tomada de decisões durante a exploração empírica da forma. O diálogo entre ferramentas computacionais e atividades de projeto – desenhar, executar modelos físicos, analisar e testar – envolvem escolhas, por exemplo, quanto à eficiência energética, que podem ser auxiliadas por ferramentas de aprendizagem que explorem a interação entre modelos físicos e digitais. Este trabalho associa a manipulação da forma ao conhecimento sobre seu desempenho energético usando, simultaneamente, dois modelos, físico e digital. O modelo físico apoia a manipulação da composição volumétrica e da fenestração, enquanto o modelo digital permite avaliar o impacto ambiental das escolhas através da simulação do consumo energético. Para capturar a posição dos elementos físicos que compõem o envoltório, o modelo físico utilizou uma câmera e marcadores para capturar a translação e rotação destes elementos. A alteração das dimensões das fenestrações foi controlada, em meio físico, por meio de potenciômetros que gerenciaram a proporção dos planos translúcidos das fachadas com auxílio da plataforma *Arduino*. O modelo físico conectou-se ao modelo digital através das ferramentas computacionais *Rhinoceros* e *Grasshopper*, com auxílio do *plug-in Firefly* e da plataforma *ReactVision*. O modelo digital simulou o desempenho energético utilizando o software *EnergyPlus* e os *plug-ins* do *Grasshopper*, *Ladybug* e *Honeybee*. Como prova de conceito, foi concebido um exercício de exploração da forma, tendo como parâmetro a minimização do consumo de energia para aquecimento e refrigeração do ambiente interno de uma edificação de uso comercial composta por dois prismas regulares. O experimento, que contou com a participação de alunos de graduação de curso de arquitetura e urbanismo, mensurou transformações geométricas, quantidade e desempenho das soluções geradas vis a vis tempo de manipulação (trinta minutos). Relacionando as ações projetuais dos estudantes aos resultados de desempenho da forma, observou-se redução do consumo de energia. Foi possível concluir que o uso do modelo físico associado ao modelo digital pode aumentar a segurança do estudante ao escolher alternativas de projeto ao tomar decisões sobre o desempenho energético de edificações, assim como, pode aumentar a fixação de conteúdos que relacionam forma arquitetônica e desempenho ambiental durante processos de ensino e aprendizagem.

Palavras-chave: desempenho, etapas iniciais de projeto, aprendizagem, processo de projeto, consumo de energia.

ABSTRACT

Physical models allow quick and intuitive shape's manipulation during design and exploration phases of the building's envelope. On the other hand, digital performance models offer quantitative results, which may contribute to decision making throughout empirical exploration of the shape. The dialogue between computational tools and design activities – drawing, run physical models, analyzing and testing – involves choices, for example, regarding energy efficiency, that be able to aided by learning tools who exploring the interaction between physical and digital models. This work associates shape exploration with the knowledge about the project's energy performance, apply simultaneously, two models, physical and digital. The physical model supports fenestration and shape composition manipulation, while the digital model allows evaluate the environmental impact of choices through energy consumption simulation. To capture the position of physical elements that make up the building envelope, the physical model used a camera and markers to capture the translation and rotation position of these elements. The manipulation of fenestration dimensions was controlled, in physical media, by means of potentiometers that managed the proportion of façade translucent planes, with support from *Arduino* platform. The physical model connected to the digital model by means of computational tools: *Rhinoceros* and *Grasshopper*, with support from *Firefly* plug-in and the *ReactVision* platform. The digital model simulated the energy performance using the software *EnergyPlus* and the *Grasshopper* plug-ins: *Ladybug* and *Honeybee*. As proof of concept, a shape exploration exercise was designed, with as a parameter the energy consumption minimization to heating and cooling the internal environment of a commercial building, composed of two regular prisms. The experiment, that had the undergraduate architecture and urbanism students' participation, measured geometric transformations, quantity and the performance of generated solutions in relation to manipulation time (thirty minutes). Relating the students' activities and shape performance results, reduction of energy consumption was observed. It was possible to conclude that using physical models associated with digital models can increase the student reliability when choosing project alternatives, during the building energy performance decision making, as well as, may increase the ability to fix contents that relate architectural shape and environmental performance, during learning and teaching processes.

Keyword: performance, early design stages, learning, design process, energy consumption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Curva proposta por MacLeamy (2004).....	19
Figura 2 Estrutura do processo de projeto descrito por Lawson.	30
Figura 3 Conjunto de questões abordadas na concepção das aberturas.	33
Figura 4 Estrutura proposta para um IDeA – <i>Intelligent Design Assistant</i>	39
Figura 5 Gráfico relacionando as decisões de projeto às fases do processo projetual e simulação.	42
Figura 6 Processo de interação humano-computador.....	48
Figura 7 Exemplo das representações gráficas e geométricas que o <i>Ladybug</i> apresenta para diferentes tipos de análise.....	54
Figura 8 Diagrama da estrutura do programa <i>EnergyPlus</i>	59
Figura 9 Esquema gráfico dos parâmetros considerados no (1) balanço de energia das superfícies externas e (2) balanço de energia das superfícies internas.	60
Figura 10 Estrutura do protótipo de ambiente simplificado de aprendizagem (PASA)	63
Figura 11 Elementos que compõem o modelo físico.....	64
Figura 12 Modelo físico	65
Figura 13 Exemplo de marcadores – <i>Fiducial Marker</i>	65
Figura 14 Base de delimitação do ambiente físico	66
Figura 15 Transformações geométricas propostas para o modelo físico	67
Figura 16 Plataforma arduino e potenciômetros.....	68
Figura 17 Estrutura do modelo digital.....	70
Figura 18 Diagrama do fluxo das ferramentas computacionais que realizam a associação entre modelo físico e digital.....	71
Figura 19 Monitores utilizados para representação digital	72
Figura 20 Registro do uso do PASA.....	73
Figura 21 Representação do monitor 1	77
Figura 22 Representação do monitor 2	78
Figura 23 Gift4.....	85
Figura 24 Exemplo de tipologias comerciais encontradas em Porto Alegre/RS.....	86
Figura 25 Peças propostas para o exercício projetual	87
Figura 26 Perspectivas sudoeste e nordeste da volumetria adotada como forma inicial do exercício projetual proposto	92

Figura 27 Exemplo de gráfico correlacionando consumo de energia e soluções aferidas	99
Figura 28 Exemplo de gráfico correlacionando consumo de energia e porcentagem adotada para as fenestraçãoes	100
Figura 29 Exemplo gráfico correlacionando consumo de energia e tempo entre cada simulação	101
Figura 30 Exemplo de Gráfico com Curvas de Tendência, representando a sequência das soluções de projeto em relação ao consumo de energia	102
Figura 31 Exemplo de gráfico com a sequência das ações de projeto e os resultados gráficos e numéricos decorrentes dos procedimentos adotados.....	105
Figura 32 Gráfico mostrando o percurso gerado por cada participante de acordo com o consumo de energia e quantidade total de soluções simuladas	109
Figura 33 Gráfico mostrando o período em que as soluções com menor consumo de energia foram simuladas	110
Figura 34 Gráfico mostrando as soluções geométricas com menor consumo de energia encontradas por participante e linha representando a média.....	111
Figura 35 Soluções geométricas simuladas pela amostra durante exercício projetual	112
Figura 36 Gráfico mostrando a relação entre as soluções selecionadas pelos participantes e as soluções mais eficiente encontrada durante seu processo projetual	114
Figura 37 Gráfico mostrando o percurso gerado pelos seis participantes com menor número de soluções aferidas.	117
Figura 38 Gráfico mostrando o período em que as soluções com menor consumo de energia foram simuladas ao longo do processo de projeto	119
Figura 39 Gráfico mostrando o percurso gerado pelos três participantes com os resultados mais expressivos de minimização do consumo de energia	120
Figura 40 Geometria com desempenho mais eficiente, proposta pelos participantes 'I' e 'T'	121
Figura 41 Gráfico correlacionando consumo de energia (MWh) e tempo (minutos) entre cada simulação do participante 'I'	122
Figura 42 Gráfico correlacionando consumo de energia (MWh) e tempo (minutos) entre cada simulação do participante 'T'	122

Figura 43 Gráfico com Curvas de Tendência dos seis participantes com maior grau de minimização do consumo de energia	123
Figura 44 Mapeamento das transformações geométricas e resultados de desempenho e geometria obtidos em sequência cronológica pelo participante 'I' ..	128
Figura 45 Mapeamento das transformações geométricas e resultados de desempenho e geometria obtidos em sequência cronológica pelo participante 'T' .	130
Figura 46 Histograma correlacionando consumo de energia e porcentagem das fenestrações adotada pelo participante 'I'	133
Figura 47 Histograma correlacionando consumo de energia e porcentagem das fenestrações adotada pelo participante 'T'	135
Figura 48 Gráfico com Curvas de Tendência do participante "F"	152
Figura 49 Gráfico mostrando a relação entre as soluções selecionadas pelos participantes e as soluções mais eficiente encontrada durante seu processo projetual	153
Figura 50 Exemplo de croquis elaborados durante o experimento	154
Figura 51 Gráfico correlacionando consumo de energia e tempo entre cada simulação do Participante 'A'	155
Figura 52 Gráfico correlacionando consumo de energia e tempo entre cada simulação do Participante 'B'	156
Figura 53 Registro do uso do PASA.....	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Modelo de tabulação dos dados do exercício	98
Tabela 2 Lista de variáveis com a representação gráfica em ícones para a estruturação do Mapa de Procedimentos.....	104
Tabela 3 Exemplo de um Mapa de Procedimento.....	105
Tabela 4 Tabela com a quantidade total de soluções aferidas e resultado da simulação com menor consumo de energia obtido por participante.....	115
Tabela 5 Mapeamento das transformações geométricas e resultados de desempenho obtidos em sequência cronológica pelo participante 'I' e 'T'	127
Tabela 6 Tabela com a sequência de manipulações da forma, proporção das aberturas e resultados de desempenho dos participante 'I', 'T', 'S', 'Q', 'R' e 'E'	132
Tabela 7 Tabela com a sequência de manipulações da forma, proporção das aberturas, tempo e resultados de desempenho do participante 'I'	134
Tabela 8 Tabela com a sequência de manipulações da forma, proporção das aberturas, tempo e resultados de desempenho do Participante 'T'	136
Tabela 9 Tabela com a sequência de manipulações da forma, proporção das aberturas, tempo e resultados de desempenho do Participante 'U'	137
Tabela 10 Tabela com as dez soluções que apresentaram menor consumo de energia entre o total de simulações realizadas ao longo do experimento pelos vinte e um graduandos	139
Tabela 11 Tabela com soluções que apresentaram a mesma proporção de planos translúcidos e configurações geométricas distintas	140
Tabela 12 Tabela com soluções que apresentaram a mesma proporção de planos translúcidos e configurações geométricas distintas	141
Tabela 13 Tabela com soluções que apresentaram volumetrias iguais e alteram apenas a proporção do plano translúcido Norte.....	142
Tabela 14 Tabela com soluções que apresentaram volumetrias iguais e alteram apenas a proporção do plano translúcido Sul	142
Tabela 15 Tabela com soluções que apresentaram volumetrias iguais e alteram apenas a proporção do plano translúcido Leste.....	143
Tabela 16 Tabela com soluções que apresentaram volumetrias iguais e alteram apenas a proporção do plano translúcido Oeste	143

Tabela 17 Tabela com soluções que apresentaram mesma volumetria e alteram a proporção do plano translúcido Leste e Oeste	144
Tabela 18 Tabela com soluções que apresentaram mesma volumetria e alteram a proporção do plano translúcido Norte e Oeste	145
Tabela 19 Tabela correlacionando os dados do questionário inicial e solução minimizada individualmente pela amostra.....	147
Tabela 20 Porcentagens resultantes do questionário inicial do experimento.....	148
Tabela 21 Porcentagens resultantes do questionário final do experimento	149
Tabela 22 Tabela com a sequência de manipulações da forma, proporção das aberturas, tempo e resultados de desempenho do Participante 'I'	157

LISTA DE ABREVIATURAS

CAAD – computer-aided architectural design /projeto arquitetônico assistido por computador

CAD – computer-aided design/ desenho assistido por computador

CDP – *collaborative design platform* ou plataforma colaborativa de design

CE – consumo de energia para aquecimento e refrigeração

CERL – U.S. construction engineering research lab /laboratório de pesquisa em engenharia de construção do exército dos Estados Unidos

DOE – United States Department of Energy/ Departamento de Energia dos Estados Unidos

EIP – etapas iniciais de projeto

ESDA – *exploratory sequential data analysis/ análise exploratória sequencial de dados*

HVAC – *heating, ventilation and air conditioning/ aquecimento, ventilação e ar condicionado*

IDF – *input data file/*

IHC – interação humano-computador

kWh – quilowatt-hora

LBNL – *Lawrence Berkeley national laboratory/ laboratório nacional Lawrence Berkeley da Universidade da Califórnia*

MWh – megawatt-hora

PASA – protótipo de ambiente simplificado de aprendizagem

SIMMLAB – laboratório para simulação e modelagem em arquitetura e urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

TCLE – Termo de Consentimento Livre Esclarecido

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	17
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	28
1.1 Processo de Projeto	28
1.1.1 Projeto Auxiliado por Modelos Físicos	34
1.1.2 Projeto Auxiliado por Computador.....	37
1.1.3 Projeto Baseado em Desempenho.....	40
1.1.4 Envoltório e Desempenho da Forma Edificada	44
1.2 Interação Humano- Computador	47
1.2.1 Interfaces.....	49
1.2.1.1 Interfaces Tangíveis	51
1.2.2 Ferramentas Computacionais em EIP	52
1.2.2.1 Rhinoceros 3D como ferramenta de modelagem	53
1.2.2.2 Ferramentas de auxílio à simulação energética	56
1.2.2.3 <i>EnergyPlus</i> como ferramenta de simulação	58
2 MATERIAIS E MÉTODO	62
2.1 Metodologia	62
2.1.1 Modelo físico	64
2.1.2 Modelo digital	70
2.2 Experimento	79
2.2.1 Método quantitativo	80
2.2.2 Método qualitativo	82
2.3 Preparação do Experimento.....	82
2.3.1 Objetivo da avaliação	83
2.3.2 Tarefa	83
2.3.3 Amostra.....	84
2.3.4 Material.....	85
2.3.5 Protocolo de avaliação	87
2.3.6 Questionário	94
2.3.7 Teste Piloto	95
2.3.8 Coleta de Dados.....	97
3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	107

3.1 Análise quantitativa	107
3.1.1 Dados Gerais de Desempenho	108
3.1.2 Quantidade de Soluções	115
3.1.3. Tempo	118
3.1.4 Ações de projeto	125
3.1.5 Desempenho x manipulação da forma	126
3.1.6 Desempenho x proporção de aberturas	131
3.1.7 Fatores que impactam na minimização do consumo de energia.....	138
3.2 Análise Qualitativa.....	146
3.2.1 Características da amostra.....	146
3.2.2 Identificação dos fatores que impactam o uso da ferramenta	151
3.2.3 Tempo	151
3.2.4 Gabarito.....	151
3.2.5 Particularidades da amostra.....	152
3.2.6 Consideração de outros aspectos arquitetônicos.....	153
CONCLUSÕES	159
REFERÊNCIAS.....	164
APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO INICIAL APLICADO AOS PARTICIPANTES DO EXPERIMENTO	176
APÊNDICE B – GABARITO FORNECIDO PARA AOS PARTICIPANTES DO EXERCÍCIO.....	177
APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO FINAL APLICADO AOS PARTICIPANTES DO EXPERIMENTO	181
APÊNDICE D – TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE ESCLARECIDO	182
APÊNDICE E – JUSTIFICATIVA PARA A ESCOLHA DE SOLUÇÃO EM POTENCIAL PARA PARTIDO ARQUITETÔNICO.....	184
APÊNDICE F – TABULAÇÃO DOS DADOS GERAIS DA AMOSTRA.....	187
Participante A.....	188
Participante B.....	191
Participante C.....	194
Participante D.....	197
Participante E.....	200
Participante F.....	203
Participante G.....	206

Participante H.....	209
Participante I	212
Participante J.....	215
Participante K.....	218
Participante L	221
Participante M	224
Participante N.....	227
Participante O.....	229
Participante P	232
Participante Q.....	235
Participante R.....	238
Participante S.....	241
Participante T	244
Participante U.....	247
APÊNDICE G – MAPEAMENTO DAS AÇÕES DE PROJETO	250
APÊNDICE H – RELAÇÃO TOTAL DE SIMULAÇÕES REALIZADAS PELA AMOSTRA DURANTE EXERCÍCIO DE PROJETO.....	257
APÊNDICE I – SIMULAÇÕES REALIZADAS INDIVIDUALMENTE PELOS PARTICIPANTES.....	260

INTRODUÇÃO

O processo projetual envolve fatores contextuais, como: clima, topografia, sociedade, legislação, cultura, além de abranger aspectos como materiais, técnicas construtivas, performance ambiental, desempenho energético, sustentabilidade e responsabilidade econômica. Considerando a complexidade do processo de projeto, é difícil encontrar uma solução otimizada para todos seus fatores, simultaneamente. Compreendido como um processo de solução de problemas e orientado por uma sequência de metas determinadas por um sistema operativo, (MITCHELL, 1975) a sistematização do processo de projeto envolve desenhar, inspecionar e revisar, criando uma sequência de interações entre a mente do arquiteto e a representação da proposta elaborada.

Problemas de arquitetura são geralmente do tipo aninhados, ou seja, possuem vários níveis de soluções parciais, com complexidade de soluções não aparentes, levando à formulação de outros problemas. Tais problemas podem também ser caracterizados como mal definidos – *wicked problems* – em que parte da especificação do problema é desconhecida (LAWSON, 2005), permitindo mais do que uma possibilidade de resolução satisfatória. Ao tentar encontrar suas soluções, o arquiteto estabelece um processo de geração de possibilidades, avaliando qualidades e limitações de alternativas. (RITTEL; REUTER, 1992). O processo de projeto, em suas fases iniciais, pondera diferentes alternativas e combinações de parâmetros, priorizando alguns em detrimento de outros, estabelecendo um exercício de análise do tipo multicritério. Frequentemente, as decisões adotadas em fases iniciais de projeto são baseadas na experiência e no uso de “regras de boa conduta”. Um exemplo típico de regra de *boa conduta* no hemisfério sul é o posicionamento das fachadas e áreas de abertura, minimizando as superfícies expostas à orientação solar oeste. Essa regra visa contribuir com o conforto térmico, reduzindo a necessidade de resfriamento artificial da edificação em períodos quentes. No entanto, nem sempre as decisões adotadas desta maneira, resultam em soluções eficientes. (CELANI, 2012).

Para Mitchell (1975) o uso do CAAD pode exercer, exclusivamente, a função de representação, ou pode contribuir para a avaliação das alternativas de projeto e

soluções de problemas mal definidos. Se o computador puder se converter em ferramenta de auxílio à avaliação de problemas mal definidos (LAWSON, 2005), diferentes incertezas inerentes ao processo de projeção podem ser dirimidas através da avaliação de alternativas (muitas vezes geradas automaticamente) desde as fases iniciais do processo de projeto.

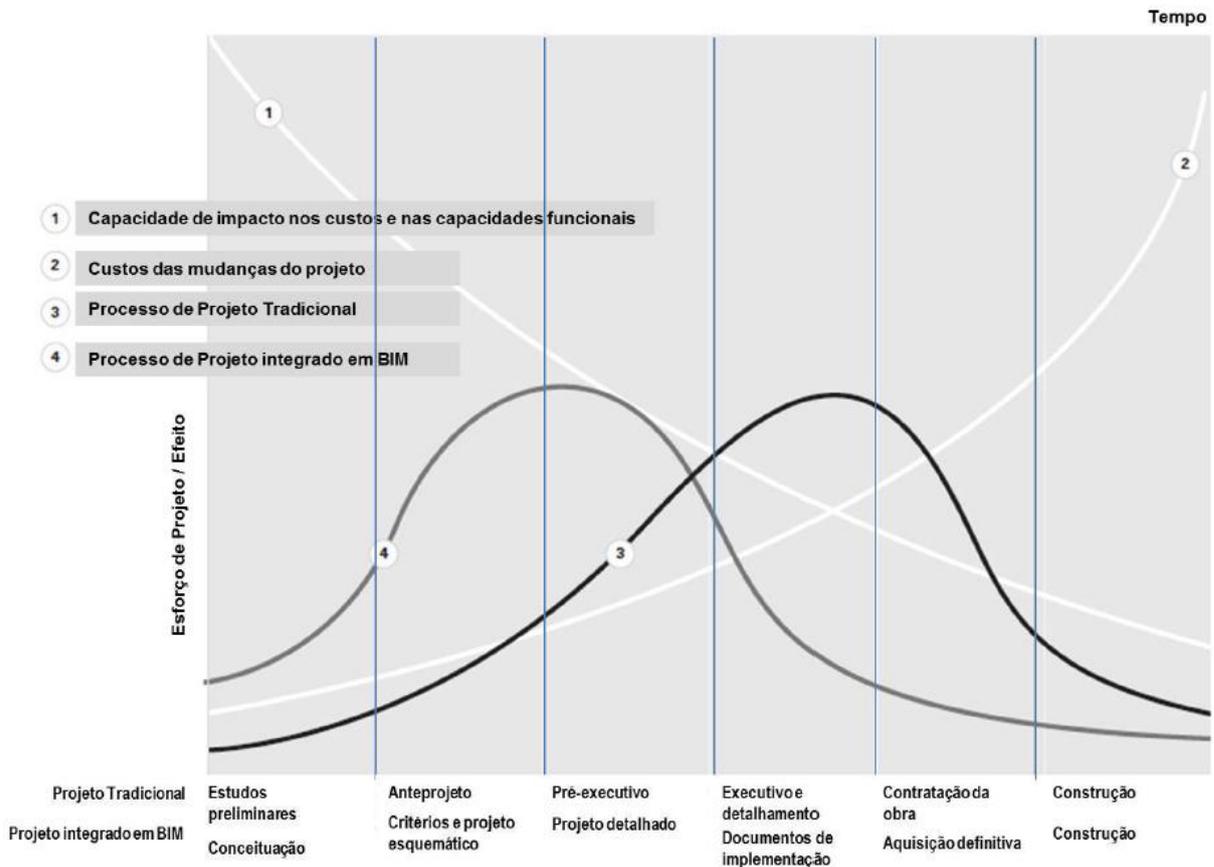
Dentre as incertezas e dificuldades que o arquiteto depara-se nas fases iniciais de projeto, encontra-se a definição das características morfológicas do envoltório da edificação. O envoltório realiza a separação física entre o interior e exterior do edifício (STAIB; DÖRRHÖFER; ROSENTHAL, 2008), auxiliando no controle da temperatura interna e desempenhando função similar à que a pele exerce sobre o corpo humano, estabelecendo trocas de temperatura (FROTA; SCHIFFER, 2003) e atuando na proteção e relação com o meio. Sabidamente, os elementos que compõem o envoltório – planos de fachada, cobertura, revestimentos, aberturas – afetam diretamente no desempenho energético da edificação.

A forma do envelope que é definida nas primeiras fases do processo de projeto sofre pequenas alterações até suas últimas etapas. (GRANADEIRO, et al., 2013). Ao esboçar o envoltório – desenhando planos opacos e translúcidos, delimitando a forma e percentuais de aberturas, criando elementos de sombreamento e indicando os materiais empregados – o arquiteto trata de aspectos quantitativos e qualitativos, que influenciam o desempenho da edificação. Intervenções nas fases iniciais de projeto, especialmente sobre o envoltório, são determinantes para a redução de custos futuros com alterações de projeto, construção e funcionamento. O custo das alterações do projeto aumenta, exponencialmente, conforme avança o processo projetual, fundamentando a importância que o auxílio de análises e simulações computacionais podem desempenhar em etapas iniciais de projeto (EIP). (RITTER, et al., 2014).

Em etapas finais do processo de projeto, a forma do envoltório já está vinculada às funcionalidades e tecnologias do edifício, tornando as alterações de projeto mais onerosas e difíceis. A curva proposta por Patrick MacLeamy (2004) na Figura 1 demonstra, através das linhas 1 e 2, a relação entre o esforço de concepção e tempo despendido, comprovando que alterações em fases tardias oneram o custo de projeto. A linha 3 indica como o esforço de projeto é

tradicionalmente distribuído, enquanto a linha 4 propõe uma nova distribuição do esforço de projeto em relação as etapas projetuais.

Figura 1 Curva proposta por MacLeamy (2004)



Fonte: American Institute of Architects (2007) apud Manzione (2013).

Para Attia et al. (2011) a avaliação do desempenho energético é realizada tardiamente no processo de projeto. Tradicionalmente, arquitetos e engenheiros utilizam as simulações como ferramenta para dimensionamento de equipamentos ou para relatar graus de eficiência energética, ergonômica, ambiental depois que o projeto e edifício foram finalizados. Para que a avaliação do desempenho seja inserida em EIP, auxiliando os profissionais a criar soluções de design mais eficientes, torna-se necessário desenvolver métodos de projeto, úteis e economicamente viáveis. (JABI, 2015).

Tentativas de inserção de procedimentos de avaliação da forma arquitetônica em EIP não são recentes. Maver (1988), ao publicar "*Software Tools for the*

Technical Evaluation of Design Alternatives” postulou a relevância do desenvolvimento de ferramentas que propiciassem a exploração ativa de alternativas e comparação de resultados nas fases conceituais, como meio de auxílio à tomada de decisões. A inclusão dos procedimentos de análise nas etapas iniciais do projeto tem sido um constante desafio para o desenvolvimento de ambientes computacionais e metodologias de projeto. Kolarevic e Malkawi (2005) em “*Performative Architecture Beyond Instrumentality*” relatam a abundância de modelos analíticos que poderiam contribuir para a avaliação do projeto nas suas etapas iniciais, mas que, transformados em ferramentas digitais são, na maioria, adequados somente para avaliações em etapas finais.

Dentre os principais problemas enfrentados pelo arquiteto para avaliar computacionalmente o envoltório nas fases iniciais de projeto, destaca-se o tempo demandado para modelar e simular soluções arquitetônicas. (GRANADEIRO, et al., 2013). Celani (2012) lembra que a dificuldade em implementar modelos integrados de informação deve-se ao custo elevado, exigindo treinamento especializado para uso das ferramentas e grande poder de processamento computacional, inviabilizando o acesso para grande parte dos profissionais. A indústria de TI tenta oferecer recursos para avaliar edifícios em etapas de concepção do projeto, através de softwares e aplicativos de análise simplificada como *Autodesk Ecotect Analysis*^{®1}, *Vasari*[®] e *EnergyPlus*[®]. A análise simplificada pode ser realizada por processamento em nuvem, softwares gratuitos e, muitas vezes, ferramentas intuitivas, aliviando os requisitos de hardware e viabilizando a utilização por um grupo maior de usuários. (CELANI, 2012). Recentemente, estudos explorando o potencial associativo das ferramentas *Grasshopper* e *EnergyPlus* foram publicados por: Negendahl (2015), Mackey, Roudsari e Subramaniam (2015), Konis, Gamas e Kensek (2016), Roudsari e Subramaniam (2016), Braasch (2016), Fang (2017) Mackey et al. (2017a), Salamone et al. (2017), Mackey et al. (2017b), Mackey e Roudsari (2017) e Strunge e Radgivende (2017). Não obstante esta oferta, ambientes de simulação como são ainda prevalentemente utilizados em etapas avançadas do projeto, constituem indicador de dificuldades para uso em EIP.

¹ O software Ecotect Analysis foi descontinuado em 2015 pela Autodesk, sendo que suas funcionalidades foram integradas à família de produtos Revit. Deste modo, o software Ecotect não recebeu mais atualizações e apenas versões anteriores a 2015 estão em uso.

Granadeiro et al. (2013) sugeriram que os arquitetos devam trabalhar com novos protocolos de design em EIP, integrando criatividade e os requisitos de simulação de desempenho da construção, dado o consumo de aquecimento e refrigeração. Postulam que variáveis como iluminação artificial, equipamentos e ganho de calor interno por ocupante, devam ser inicialmente desconsideradas assim como a compartimentação interna e, conseqüentemente, a diferenciação de zonas térmicas e aferição do desempenho lumínico.

Com o desenvolvimento da modelagem e simulação digital, o processo criativo tem desafiado o campo da interface humano-computador em busca de um melhor diálogo entre as ferramentas computacionais e atividades de projeto (desenhar, analisar, descobrir, testar, revisar e discutir) que, nas fases iniciais, são expressas por esboços, croquis e maquetes físicas. (BUENO; TURKIENICZ, 2014). Ao mesmo tempo que a representação por meio de esboços gráficos estimula a imaginação e auxilia na produção de novas ideias. (FLORIO; TAGLIARI, 2008) modelos digitais oferecem avaliações precisas e representações que, sem o auxílio de ambientes computacionais, tornariam o processo de projeto lento, oneroso e, muitas vezes, inviável. Modelos computacionais se limitam a visualização bidimensional da superfície digital, mas propiciam vantagens em relação aos modelos físicos quando são necessários dados numéricos, precisão e rapidez. Por outro lado, modelos físicos proporcionam ao usuário uma compreensão intuitiva da geometria e das relações físicas complexas que são difíceis e, muitas vezes, impossíveis de descrever em pixels na tela plana de um computador. (ISHII, et al., 2004).

A maquete física tem, historicamente, exercido papel importante como representação do objeto em que o objeto de estudo pode ser contemplado de diversos ângulos. (KOWALTOWSKI, et al., 2006). Habilidades físicas, agarrar, tatear e manipular materiais podem auxiliar o arquiteto no ato projetual, permitindo o aprofundamento do processo de conhecimento e aumentando o potencial de colaboração entre arquitetos e especialistas. (ISHII, et al., 2004). A forma física possibilita a manipulação rápida do modelo, oferecendo dinamismo, especialmente na fase de concepção, quando o processo de projeto é colaborativo (ISHII, et al., 2004), podendo envolver vários profissionais e disciplinas. A utilização de modelos físicos pode contribuir para a mensuração do desempenho e constituir método

confiável, quando os modelos físicos são confeccionados com precisão dimensional. (PEREIRA; PEREIRA; CASTAÑO, 2012).

A associação de modelos físicos e digitais durante o processo de criação foi avaliada por Kim e Maher (2008), Isa (2014), Jabi (2014), Ritter et al. (2014) e Rose (2015). Kim e Maher (2008) confrontaram o uso de modelos tangíveis e gráficos, através de experimentos, demonstrando que a compreensão das relações espaciais em modelos virtuais é aprimorada com a utilização, em conjunto, com elementos físicos em escala reduzida ou real. Ao descrever a associação de modelos físicos e digitais, Isa (2014), apresenta uma classificação para os modelos físicos (*soft*, *hard*, *presentation* e *prototype*), descrevendo o potencial e restrição de cada modelo em relação às etapas projetuais. Isa (op. cit.) demonstra que os modelos físicos e protótipos são indispensáveis para a prática projetual e postula que o uso extensivo destes recursos pode ter influência sobre como os profissionais de arquitetura gerenciam seus processos de projeto. Até o momento, escassas publicações abordam a relação desses ambientes digitais associados a modelos físicos de manipulação durante o processo de tomada de decisões em estágios iniciais de projeto. A associação de ferramentas desse tipo com modelos físicos de manipulação, em processos de aprendizagem e tomada de decisão para minimização do consumo de energia ainda é pouco explorada.

O método proposto por Ritter et al. (2014) associa modelos físicos e digitais como ferramenta de auxílio a tomada de decisões em projeto (*design decision support* – DDS), resultando em uma plataforma colaborativa de design (CDP), composta por uma ferramenta de simulação paramétrica e elementos em escala reduzida. Ao invés de utilizar modelos físicos, a abordagem combina modelos reais e digitais de simulação, expandindo as possibilidades de concepção e integrando a avaliação ao fluxo criativo de trabalho. A plataforma colaborativa consiste em uma mesa *multi-touch*² com scanner integrado a objetos tridimensionais em escala 1:500. A metodologia foi testada em projeto de edifício comercial em que o arquiteto manipulou a forma física e realizou simulações de desempenho energético utilizando

² Em computação o Multi-touch é uma tecnologia que reconhece mais de um ponto de contato com uma superfície digital. Um dispositivo digital reconhece gestos de toque em uma plataforma, localizando, movimentando e relacionando pontos de um sistema computacional, de modo que várias pessoas podem interagir com a mesma plataforma.

o programa EnergyPlus³. Com tais recursos o arquiteto pode investigar a demanda para aquecimento e refrigeração correlacionando configurações e volumetria ao desempenho energético. Os parâmetros geométricos – altura, largura, comprimento e orientação – foram definidos através do modelo físico, enquanto as características do envoltório – transmitância e resistência dos materiais opacos e translúcidos, e coeficiente de ganho de calor – foram determinados através da interface CDP *multi-touch*. A abordagem comprovou potencial utilização para indicar como o projeto pode ser otimizado, através da utilização de um ambiente de projeto conhecido, dispensando o uso de ferramenta específica de simulação. (RITTER et al., 2014). O modelo volumétrico, proposto por Ritter (op. cit.) restringiu-se a um prisma, em que somente a altura, largura e comprimento do volume poderiam ser alterados durante a discussão entre os agentes do projeto (cliente, especialistas, engenheiros, arquitetos, entre outros).

Rose (2015), demonstrou o potencial de interfaces físicas de manipulação e interfaces digitais de simulação associadas à densidade urbana. Com peças de Lego, uma mesa de acrílico, uma câmera e um projetor, os diferentes colaboradores e profissionais envolvidos no projeto, puderam manipular a maquete física, e analisar os resultados de desempenho projetados sobre as peças de Lego, permitindo a avaliação de diferentes cenários urbanísticos. O modelo de desempenho consistiu em três métricas: consumo de energia operacional, caminhabilidade⁴ e disponibilidade de iluminação natural. Rose (2015) identificou que os usuários utilizaram a interface para melhorar o desempenho dos bairros modelados em relação a duas, das três métricas de desempenho oferecidas.

Em etapas iniciais do processo de projeto, quando o arquiteto ou acadêmico em arquitetura está explorando a forma arquitetônica motivado pelo conhecimento implícito, informações estruturadas são escassas. A maioria das informações e ações envolvidas em EIP são motivadas pelo conhecimento tácito, não sendo

³ EnergyPlus é um programa computacional, em código aberto, desenvolvido inicialmente com colaboração do DOE (Departamento de Energia dos Estados Unidos), CERL (Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Construção do Exército dos Estados Unidos), LBNL (Laboratório Nacional Lawrence Berkeley), Universidade de Illinois, Universidade do Estado de Oklahoma e *Analytics GARD*

⁴ O termo caminhabilidade, definido em inglês *walkability*, consiste na relação entre comportamento e meio físico, aferindo a qualidade que uma área possui durante o ato de caminhar. A conectividade das ruas e passeios, densidade de usos, permeabilidade visual, existência de vegetação e frequência e variedade de edificações são alguns dos fatores que afetam o quão amigável é o ambiente para mensurar sua caminhabilidade.

estabelecida de maneira consciente e explícita. Dado que o conhecimento desarticulado e não verbalizado está inerente ao indivíduo, ou seja, as pessoas sabem mais do que elas verbalizam (POLANYI, 1966), este trabalho busca analisar o conhecimento tácito, frequentemente utilizado na exploração da forma através de modelos físicos e digitais, associados ao desempenho.

A cognição em projeto evidencia a relevância da tangibilidade de modelos físicos para compreender o espaço arquitetônico (TAGLIARI e FLORIO, 2012), motivando com rapidez as diferentes possibilidades de resolução dos problemas de projeto. A utilização de modelo físico e digital é avaliada por Salmaso e Vizioli (2013) através de experiência didática projetual, identificando vantagens e deficiências da maquete e dos meios digitais, concluindo que profissionais e estudantes continuam empregando modelos físicos em paralelo ao virtual em seus processos de projeto. No entanto, ainda há um distanciamento entre a modelagem física e digital, dificultando o diálogo entre os dois modelos de exploração e simulação da forma.

Avaliações de desempenho energético requerem uma quantidade de dados maior do que as disponíveis nas etapas iniciais de projeto bem como demandam maior quantidade de tempo do que o projetista está disposto a dispendir durante seu processo de criação. Para incorporar a avaliação estruturada em etapas iniciais como ferramenta de auxílio ao processo de aprendizagem, necessita-se:

- (a) reduzir a quantidade de dados do modelo de desempenho;
- (b) reduzir o tempo de simulação para gerar resultados de *feedback* e aproximar-se da velocidade que o processo cognitivo do arquiteto;
- (c) ampliar a representação das informações estruturadas e conhecimento explícito representado pelo desempenho objetivo.

Esse trabalho propõe a formulação e teste de um protótipo de ambiente simplificado de aprendizagem (PASA) voltado para a percepção do consumo energético de edificações em estudantes de arquitetura e urbanismo. O PASA associa interfaces físicas e digitais como suporte à reflexão na ação do arquiteto, oferecendo informações estruturadas ao processo heurístico de tentativa e erro. Assim, o processo heurístico, habitualmente guiado pelo conhecimento implícito do arquiteto, seria auxiliado pelo conhecimento explícito e informações quantitativas estruturadas de desempenho.

A hipótese desta tese é a de que a utilização de um ambiente simplificado, voltado para a minimização do consumo de energia em EIP, pode aumentar:

- (a) a consciência das ações projetuais de estudantes de Arquitetura e Urbanismo;
- (b) a capacidade de fixação de conteúdos durante processos de aprendizagem sobre o aquecimento e refrigeração de edifícios.

O PASA associou uma interface digital a uma interface física. A interface digital utilizou as ferramentas computacionais *Rhinoceros*, *Grasshopper* e *EnergyPlus*, através dos *plug-ins Honeybee*, *Ladybug* e *Firefly*. Enquanto a interface física associou ao modelo digital um modelo icônico de representação e elementos físicos de manipulação. O protótipo empregou um conjunto de softwares e ferramentas existentes no mercado com interface amigável e plataforma em código aberto que proporcionam a integração entre modelagem física, computacional e aferição de desempenho⁵.

O protótipo proposto pela tese foi constituído por dois modelos: físico e digital. O modelo físico foi composto por uma base de manipulação da geometria do envoltório e comandos físicos para o controle da porcentagem de aberturas. O modelo digital utilizou ferramentas computacionais para captar o modelo físico, avaliar o desempenho energético, representar geometricamente a proporção das fenestrações e apresentar os resultados da simulação energética visualmente, representados em gráfico e números. As manipulações concentram-se no modelo físico enquanto o modelo digital abordou a simulação e visualização dos resultados e geometria. O modelo físico utilizou uma câmera e marcadores, do tipo *fiducial markers*⁶, para captar a posição dos elementos físicos que compõe a forma do envoltório. A manipulação dos elementos ocorreu segundo as transformações geométricas: translação e rotação, enquanto que a transformação geométrica das fenestrações ocorreu por meio de potenciômetros que controlaram a escala dos planos translúcidos das fachadas com auxílio de uma plataforma *Arduino*. O modelo

⁵ Uma vez que a tese utiliza ferramentas computacionais existentes, não ambiciona a construção de um objeto de aprendizagem, isso porque, seria necessário considerar e avaliar aspectos como adaptabilidade, através de avaliações em ambiente de ensino, reusabilidade, através de aferições em diferente contexto de aprendizagem, entre outros aspectos que não estão contemplados neste trabalho.

⁶ *Fiducial markers* consistem em padrões de representação em ambiente físico, sendo detectados automaticamente por câmeras digitais, através da utilização de acompanhamento de detecção algorítmica. (FIALA, 2005).

físico conectou-se ao modelo digital através das ferramentas computacionais: *Rhinceros/Grasshopper*, com auxílio do *plug-in Firefly* e da plataforma *open-source ReactVision*. O modelo digital consistiu na parametrização dos elementos de fachada e simulação do desempenho energético utilizando o software *EnergyPlus* e os *plug-ins* do *Grasshopper: Ladybug* e *Honeybee*.

O PASA buscou identificar as contribuições da metodologia como uma possível ferramenta de aprendizagem e auxílio à tomada de decisões, avaliando um grupo de alunos. O experimento modelou edificações de uso comercial e foi aplicado a 21 graduandos da Faculdade de Arquitetura da UFRGS, tendo como pré-requisito ter cursado minimamente as disciplinas do sexto semestre, incluindo a disciplina de habitabilidade das edificações. A restrição relacionada aos pré-requisitos teve como ponto de partida a ideia de que a amostra deveria possuir contato prévio com os conceitos de física aplicada a habitabilidade, como calor e termodinâmica, comportamento da luz, clima, iluminação e ventilação natural e forçada.

Os graduandos foram motivados a encontrar soluções para o envoltório que minimizassem o consumo energético mantendo critérios arquitetônicos que usualmente consideram em estágios iniciais, como: proporção, simetria, permeabilidade visual, variabilidade compositiva, salubridade, orientação solar, entre outros. Com o auxílio do PASA os graduandos foram estimulados a associar conhecimento implícito e explícito visando diminuir o tempo para elaborar soluções de projeto. O objetivo geral do trabalho consiste em avaliar se o PASA proposto tornou o projetista mais consciente de suas ações projetuais.

Ao avaliar o desempenho dos alunos ao utilizar o PASA pretende-se:

- (a) analisar o grau de aprendizagem e apresentar a tendência para o grau de usabilidade do PASA;
- (b) avaliar se a experiência, perfil, idade, e semestre dos graduandos, são decisivos para a resolução do problema de minimização do consumo de energia;
- (c) identificar se a quantidade de soluções geradas contribuiu para a minimização do consumo de energia para aquecimento e refrigeração;
- (d) quantificar as ações de projeto e sua relação com o desempenho durante o processo de exploração da forma.

A tese está organizada em 4 capítulos. O primeiro capítulo consiste na fundamentação teórica dos temas centrais abordados pela tese, com uma revisão da literatura sobre o processo de projeto e perspectivas da interação humano-computador, avaliação do desempenho e modelagem em arquitetura. O segundo capítulo apresenta os materiais e métodos, descrevendo a estrutura metodológica do PASA, ambiente caracterizado pelo modelo físico associado ao modelo digital, e o experimento de avaliação da metodologia. O terceiro capítulo descreve os dados e a análise dos resultados do experimento. O último capítulo expõe as conclusões, alcance da pesquisa e propõem aspectos que podem vir a ser tratados por trabalhos futuros.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Processo de Projeto

O processo de projeto é um campo complexo do conhecimento arquitetônico, situado entre a ciência e a arte, em que não existe um método único ou exato. Por muito tempo, a pesquisa científica procurou mapear o processo de projeto, como uma sequência de atividades distintas e ordenadas para a resolução de um ou mais problemas. No entanto, a característica não linear do processo e a diversidade e complexidade dos fatores abordados pelo arquiteto, desde as fases iniciais, estabelecem problemas com vários níveis de solução, desafiando suas habilidades cognitivas.

Segundo Rittel e Webber (1973), os problemas podem ser classificados como problemas bem definidos ou mal definidos. Os problemas bem definidos ou *well defined problems*, possuem um objetivo e regras claras, enquanto os problemas mal definidos, *wicked problems*, não apresentam formulação clara, estando sujeitos a redefinições e resoluções distintas ao longo do tempo, em que novos problemas podem surgir. (LAWSON, 2005). Para Florio (2010), os profissionais de design lidam com aquilo que poderia vir a ser, ou seja, enfrentam problemas mal estruturados, enquanto as ciências naturais, em sua maioria, lidam com o existente, problemas estruturados e bem definidos.

Informações que definem um problema podem ser expressas verbalmente, graficamente ou numericamente, incluindo analogias, exemplos ou especificações rigorosas; sendo descritas em papel ou armazenadas na memória de um organismo vivo ou computador. (MITCHELL, 1975). Ao definir problemas de projeto, Mitchell (1975) esclarece que um problema passa a existir, quando algo é desejado e as decisões necessárias para obter-se uma solução não são imediatamente óbvias. Ou seja, os problemas surgem quando algo é desejado, mas não se tem conhecimento do caminho a percorrer para alcançar o objetivo almejado.

A simples explicação da solução sem contemplar os procedimentos adotados, dificultou a compreensão dos processos mentais adotados pelo arquiteto e

inviabilizou a análise de cada fase do projeto (JONES, 1992). Soluções de problemas arquitetônicos variam conforme a intenção do arquiteto baseado em seu conhecimento explícito e implícito (LAWSON, 2005). O conhecimento explícito é sistemático, expresso através de dados e linguagem formal (NONAKA; TAKEUCHI, 1995), enquanto o conhecimento tácito⁷ é implícito, modelado mentalmente e de difícil explicitação. O conhecimento implícito sobre consumo energético de edificações é evidenciado em etapas iniciais de projeto (EIP) quando o arquiteto, embora não elaborando cálculos específicos, se vale do seu conhecimento sobre física aplicada e termodinâmica aplicada ao conforto ambiental, para representar soluções de projeto. (BUENO; TURKIENICZ, 2014).

A busca por métodos de auxílio a resolução dos problemas de projeto vem sendo debatida há muito tempo. O ensaio do filósofo francês René Descartes, *Le Discours de La Méthode* de 1637, propõe um método de resolução de problemas na busca pela verdade científica. Segundo Descartes, os problemas complexos deveriam ser decompostos tanto quanto necessário, para abordar subproblemas, mais simples, que pudessem ser resolvidos e posteriormente reunidos para, então, chegar às conclusões sobre o problema inicial. (DESCARTES, 2001). A técnica computacional recursiva denominada “*divide and conquer*” – dividir e conquistar – consiste em uma estratégia algorítmica (CORMEN, et al., 2009) que, assim como o conceito de Descartes, busca decompor problemas complexos até a simplificação do processo de resolução do problema. Estrutura similar também pode ser identificada na linguagem de padrões de Christopher Alexander, que se baseia em unidades de informação para solucionar um problema específico de projeto. (ALEXANDER et al., 1977). A linguagem estabelece uma estrutura de conexões entre padrões, formando uma rede de informações, hierarquizada em classes.

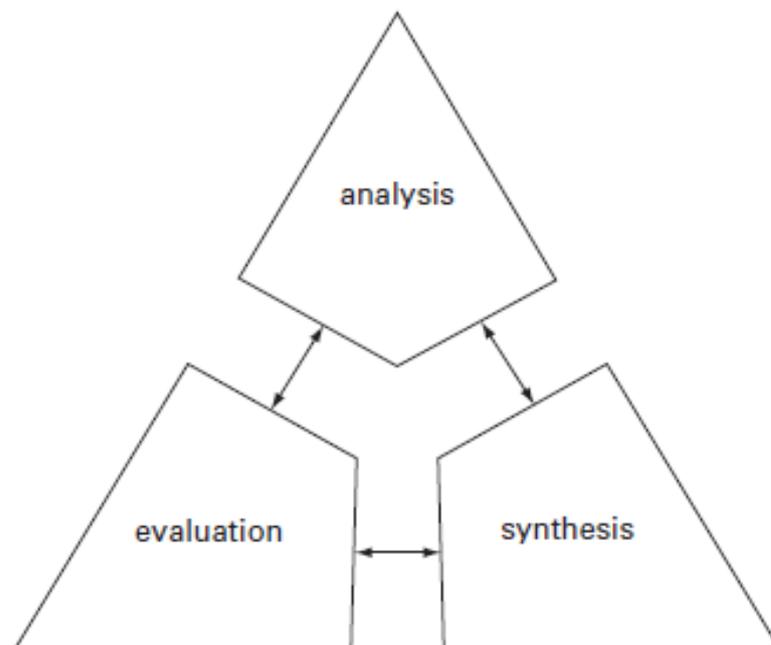
O desenvolvimento tecnológico de distintas áreas do conhecimento, motivado pelo período pós 2ª Grande Guerra contribuiu para ampliar a discussão sobre o projeto, procurando compreender o processo através da análise e avaliação de seus métodos. Na década de 1960, com o surgimento do movimento *Design Methods*, cientistas de diferentes áreas passaram a discutir os procedimentos e as atividades cognitivas envolvidas no processo de projeto. (BUCHANAN, 1992). O movimento

⁷ O conhecimento tácito é decorrente da experiência acumulada por cada indivíduo, podendo ser descrito como conhecimento não verbalizado, intuitivo, parcialmente inconsciente.

consolidou-se na conferência sediada em Londres, no ano de 1962, *The Conference on Systematic and Intuitive Methods in Engineering, Industrial Design, Architecture and Communications* (CROSS, 2007), com discussões sobre métodos sistemáticos e intuitivos em projeto de diversos campos do conhecimento. (OLIVEIRA; PINTO, 2009). A partir desse movimento, os métodos de projeto progrediram na diminuição da subjetividade do processo criativo, aplicando o conhecimento científico e a informação tecnológica para estruturar a tomada de decisões. (KOWALTOWSKI, 2011).

Outras conferências e publicações foram realizadas na sequência, com a mesma finalidade: ampliar a compreensão sobre o processo de projeto. Em *The Sciences of the Artificial* publicado em 1969, Herbert Simon tratou dos problemas relativos aos artefatos, propondo a criação de novas ciências a partir da exploração da capacidade cognitiva humana (SIMON, 1996), de modo que ao projeto interessasse não apenas o que foi concebido, mas como foi isso realizado. Em 1960, o processo de projeto foi descrito por Lawson (2005) como um processo linear e cíclico, composto basicamente pela análise, síntese e avaliação (Figura 2).

Figura 2 Estrutura do processo de projeto descrito por Lawson.



Fonte: Lawson (2005, p.40)

A estruturação do problema corresponderia à análise, a geração de soluções enquadra-se na síntese do processo e a análise das soluções corresponde a avaliação. Dentre as constatações de Lawson (2005), destaca-se a relação entre problema e solução, tratada como um sistema de retroalimentação em que todo problema pode ser reformulado e toda solução indefinidamente incrementada. Afirmou ainda que não há soluções projetuais únicas ou corretas, tendo em vista que um dado problema pode oferecer algumas soluções mais aptas do que outras.

Mitchell (1975) descreveu o processo de projeto em arquitetura como um procedimento operativo, orientado por metas que conduzem a solução dos problemas. A falta de informações e a carência de um objetivo claro (juntamente com a complexidade inerente ao problema de design) faz com que o projeto arquitetônico tenha que ser resolvido de maneira não linear, tendo diferentes ciclos. (FLORIO, 2010). Para Florio (2010, p. 376):

Como os limites do problema não estão claros, os arquitetos não podem adotar sua formulação definitiva, nem tampouco estabelecer regras fixas, pois há uma lista exaustiva de possibilidades para resolvê-lo. Consequentemente, projetos acabam sendo realizados a partir de conhecimentos prévios, por experimentação, tentativa e erro e descobertas inesperadas.

Embora amplamente discutidos, os métodos empregados durante o processo de ensino de projeto, ainda são predominantemente tradicionais, em que os alunos desenvolvem o projeto sob orientação de um instrutor experiente, arquiteto. (PUPO, et al. 2007). Schön (1987), propôs que a ação prática é geradora de conhecimento. Em *Educating the Reflective Practitioner* descreve um debate entre estudante e professor, denominado reflexão-na-ação. Através do pensar e do fazer, de acordo com Schön, os artefatos são produzidos a fim de representar e testar ideias, direcionadas a resolução do problema. Pautado pela ação reflexiva, o processo de projeto é definido como um tipo de construção, em situações de singularidade, incerteza e conflito, em que a solução instrumental do problema é secundária.

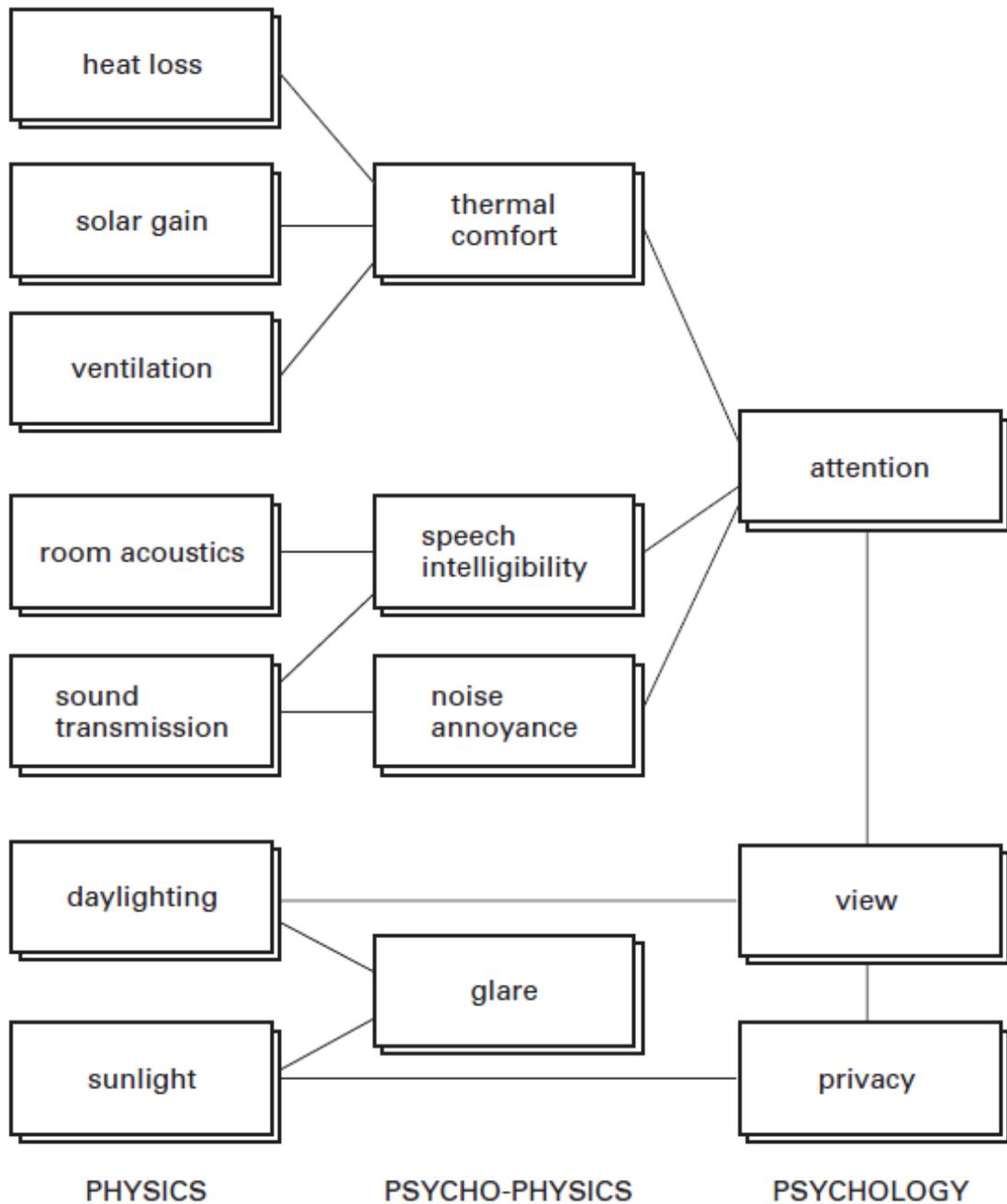
Para Schön (2000, p.43):

O processo de design, em sentido mais amplo, envolve complexidade e síntese. Ao contrário dos analistas ou dos críticos, os designers juntam coisas e fazem com que outras coisas venham a existir, lidando, no processo, com muitas variáveis e limites, algumas conhecidas desde o início e outras descobertas durante o processo de projeto.

A complexidade inerente aos problemas de projeto é exemplificada por Lawson (2005) ao descrever a dificuldade em integrar todos os requisitos de uma janela (Figura 3). A abertura é um componente multidimensional do envoltório, pois assim como necessita promover a entrada de luz solar e a ventilação natural, também requer o cuidado com a privacidade, aquecimento, perda de calor, transmissão de ruídos, implicando até mesmo nas características estruturais da edificação. Exemplificando as questões envolvidas na concepção das janelas de uma edificação, Lawson demonstra a complexidade que o estudante de arquitetura e até mesmo o arquiteto enfrenta durante o processo projetual.

Dentre múltiplas habilidades cognitivas e motoras que o projeto arquitetônico requer, habilidades como a capacidade de análise e síntese de informações, criatividade, raciocínio lógico, conhecimento, e capacidade de comunicação, destacam-se. A análise e síntese estão relacionadas ao processo de ordenar, classificar e hierarquizar informações, formulando um problema de projeto. A criatividade e raciocínio lógico consistem na capacidade de oferecer soluções espaciais, técnicas, funcionais, entre outras. O conhecimento expressa as experiências e formações anteriores e intercede a criação e desenvolvimento de soluções, enquanto a comunicação implica na representação das soluções desenvolvidas. (KOWALTOWSKI, 2011). Tais habilidades são dependentes uma das outras, resultando em inter-relações de um processo de projeto representado por ciclos e reprodução de procedimentos.

Figura 3 Conjunto de questões abordadas na concepção das aberturas.



Fonte: Lawson (2005, p.59)

A sequência de ações do projetista, que resultam em transformações da representação do projeto, promovem os avanços projetuais. (OXMAN, 1997). Para Kowaltowski (2011), o processo de criação envolve o acúmulo de informações e experiências, a formulação de hipóteses, verificação de ideias, dentre outras propriedades, que definem a complexidade da ação projetual. O processo criativo

não possui uma definição rígida ou universal para a resolução satisfatória de problemas de projeto, visto que a criatividade é uma habilidade que necessita ser praticada e cultivada continuamente. (MARÚ; FURTADO in KNEIB, 2013). Na prática o processo de criação do arquiteto, no qual o projeto arquitetônico insere-se, é conduzido por práticas intuitivas, de forma consciente, guiado pelo raciocínio, memória, evolução de ideias, criatividade e experiências (KOWALTOWSKI, 2011), como um ato reflexivo durante a ação. O projeto arquitetônico enquadra-se na família de processos de decisão (KOWALTOWSKI et al., 2006), podendo utilizar a descrição verbal, gráfica ou simbólica para antecipar analiticamente um modelo e seu comportamento.

No decorrer da atividade acadêmica e profissional, o arquiteto acumula experiências e conhecimentos em sua memória, através de representações internas – manifestadas em ações cognitivas durante a ação projetual – e representações externas – como croquis, desenhos, modelos físicos e digitais. Tais representações permitem a materialização de suas ideias, auxiliando na avaliação e comparação de diferentes soluções. (FLORIO; SEGALL; ARAÚJO, 2007). As representações internas e externas assumem papel ativo no processo de projeto, colaborando na tomada de decisões, ao tornar explícito, o que está implícito na mente do arquiteto. As representações externas, manifestadas através de desenhos a mão livre e modelos físicos executados pelo arquiteto, demonstram distintas contribuições ao longo da história da arquitetura.

1.1.1 Projeto Auxiliado por Modelos Físicos

O domínio das formas que envolvem o projeto é fato fundamental para a compreensão do espaço arquitetônico e natureza do processo de projeto. Ao explorar ideias por meio de desenhos, diagramas, modelos físicos e modelos digitais, o projetista avança em direção às possíveis soluções de projeto. Tagliari e Florio (2017) afirmam que os modelos físicos são mais concretos e tangíveis do que os desenhos, facilitando a compreensão dos elementos arquitetônicos no espaço e contribuindo para sua apreensão imediata, proveniente tanto pela visão, quanto pelo

tato. “Os conhecimentos, experiências e habilidades decorrentes da intensa manipulação de artefatos físicos conduzem o estudante a entender a natureza do espaço proposto e sua materialidade” (TAGLIARI; FLORIO, 2017), expressando o que Donald Schön denominou como reflexão-na-ação.

Os modelos físicos, também denominados pelos arquitetos e urbanistas como maquetes, têm papel fundamental no processo de projeto. (KOWALTOWSKI, et al., 2006). Para Fujioka (2005), a maquete permite que os elementos que constituem o espaço arquitetônico sejam compreendidos, auxiliando no entendimento de aspectos estruturais, iluminação, ventilação, entre outros. Modelos físicos já eram considerados, em passado remoto, referência na representação e concepção em arquitetura, como demonstrado por Felippo Brunelleschi e por Leon Battista Alberti. Alberti defendia o uso de maquetes de estudo, como uma ferramenta de projeto, promovendo a compreensão das relações espaciais e a simplicidade das partes da obra. (SALMASO; VIZIOLI, 2013). Gaudí também utilizou modelos reduzidos para explorar a forma e linguagem arquitetônica, assim como, utilizou esse método para testar soluções estruturais de sua obra (MILLS, 2007).

Além de uma ferramenta de apresentação, a maquete é um elemento de investigação e pesquisa, podendo auxiliar o meio acadêmico a exercitar fundamentos como a geometria, proporção, escala e modulação. (ARAÚJO, 2007). O modelo físico pode ser produzido em escala real ou reduzido, dependendo o objeto que está em questão e o grau de detalhamento desejado em relação à fase projetual. A contribuição que modelos físicos exercem sobre o processo de projeto, atuando como ferramenta de manipulação, representação e exploração da criatividade, é evidenciado por Lennings et al. (2000), Broek, Sleijffers e Horváth (2000), Scali, Shillito e Wright (2002), Oehlberg, Lau e Agogino (2009), entre outros.

Além de uma ferramenta de exploração e representação, a maquete é importante na comunicação de ideias durante o processo e os profissionais envolvidos, ampliando a percepção espacial dos usuários e alimentando discussões. (KOWALTOWSKI, et al., 2006). Ao avaliar a contribuição que modelos físicos podem exercer durante o processo de criação e aprendizagem, Vieira et al. (2011) destaca suas potencialidades e restrições. Vieira et al. (2011) analisou a utilização de maquetes físicas como ferramenta de aprendizagem ao realizar projeções e perspectivas nas disciplinas de desenho técnico e expressão gráfica, concluindo que

a maquete contribuiu para que 95% dos estudantes melhorassem a representação das vistas ortogonais e construção das perspectivas propostas em aula.

Kowaltowski et al. (2006) afirma a importância da maquete na concepção do projeto, como representação fiel do objeto em relação ao desenho, tendo em vista que a terceira dimensão é real e o objeto de estudo pode ser contemplado de diversos ângulos. A utilização de modelos físicos para a exploração da forma ainda é utilizada na fase de concepção por escolas de arquitetura e profissionais, como o arquiteto Frank O. Gehry e designers automobilísticos, que trabalham extensivamente com modelos em escala reduzida, mesmo tendo acesso a ferramentas de modelagem digital de superfícies curvas complexas. (ISHII, et al., 2004). Para diversos estudantes e arquitetos, como Frank O. Gehry, a tangibilidade de modelos físicos durante o processo criativo é preferível, ao invés de manipular digitalmente a geometria. (KOLAREVIC, 2003).

Para Salmaso e Vizioli (2013), a maquete pode diminuir a distância entre o arquiteto e o objeto que está sendo projetado, quando este estabelecer uma interface digital. A importância das ferramentas digitais é colocada em evidência, porém, sem desprezar a utilidade de modelos físicos como instrumento de projeto, como demonstra a experiência de escritórios de arquitetura como o de Marcos de Azevedo Acayaba, Andrade Morettin Arquitetos, Morphosis, Eisenman, Norman Foster and Partners, Gehry Partners, Richard Meier and Partners e experiências pedagógicas em Faculdades de Arquitetura como a FAU/USP (SALMASO; VIZIOLI, 2013). Designers automobilísticos trabalham extensivamente com modelos em escala reduzida, mesmo tendo acesso a ferramentas de modelagem digital de superfícies curvas complexas. (ISHII, et al., 2004).

A revisão da literatura evidencia a relevância da tangibilidade de modelos físicos para compreender o espaço arquitetônico (TAGLIARI; FLORIO, 2012), e motiva a associação de interfaces digitais como um meio de aproximar a simulação da forma. O avanço de tecnologias computacionais em um primeiro momento distanciou a prática arquitetônica dos modelos físicos. Mas com o aperfeiçoamento de tecnologias digitais, como a prototipagem rápida, fabricação digital e softwares amigáveis, o projeto auxiliado por computador passou a colaborar com a utilização de modelos físicos. O uso de modelos físicos em estágios iniciais de projeto pode auxiliar arquitetos e designers a visualizar e resolver problemas complexos. (ISA,

2014). Em contraponto, modelos digitais oferecem avaliações e representações que sem o auxílio de ambientes computacionais tornariam o processo de projeto demorado e oneroso.

1.1.2 Projeto Auxiliado por Computador

O computador oferece a possibilidade de comunicar, selecionar e compartilhar informações. (OXMAN, 1997). A introdução de ferramentas computacionais passou a influenciar a prática de projeto, coincidindo com a discussão dos métodos projetuais e tentativas de racionalização do processo projetual. Em 1960, com o movimento dos métodos de projeto e investigações sobre o processo projetual, o computador passou a ser incorporado no trabalho do arquiteto (CELANI in MITCHELL, 2008), buscando torná-lo eficiente e racional.

Desde os métodos de projeto desenvolvidos nas décadas de 1960 e 1970, ferramentas computacionais vêm contribuindo para aprimorar o processo de projeto de arquitetos, designers e urbanistas, através da modelagem, simulação e prototipagem. No entanto, a maioria dos profissionais ainda limita-se ao uso do computador como ferramenta de representação; não explorando as capacidades generativas e analíticas dos recursos computacionais.

O projeto auxiliado por computador foi descrito por Mitchell (1975), no artigo "*The theoretical foundation of computer-aided architectural design*" como uma área da ciência que busca definir problemas, representar as possíveis soluções, como podem ser geradas e avaliadas com o auxílio do computador. O uso do computador está relacionado à assistência que as ferramentas digitais podem oferecer para representação, simulação, geração, organização de dados, experimentação e exploração desses ambientes. (TIERNEY, 2007).

Os primeiros programas computacionais de auxílio ao projeto possuíam abordagens não associativas, de modo que a modificação de um componente do modelo não cumpria nenhum impacto sobre o resto da geometria. (PAPANIKOLAOU, in KARA; GEORGOULIAS, 2012). Buscando evitar a necessidade de ajustar manualmente a geometria e visando um processo mais

rápido, os programas computacionais recentemente transformaram o processo projetual em uma definição funcional do processo, que pode então gerar as formas. Desta maneira, os softwares vêm deixando de exercer a mera função de representação geométrica de formas não associadas, para cumprir o processo de geração de formas e sistematização do processo. Para Papanikolaou (in KARA; GEORGOULIAS 2012):

This shift from representation of forms to description of processes is a fundamental concept in modern computational design practice, as computer programs now follow the design instructions and remodel the resulting geometry for different input parameters.⁸

A palavra em inglês *computation* refere-se ao processamento de informações, “desde a realização de operações elementares até o estudo do raciocínio humano”. (CELANI, et al., 2006). A evolução do design digital como um campo único, motivada pelo próprio corpo de fontes teóricas e apoiado pelas novas tecnologias vem desenvolvendo-se rapidamente. As produções literárias, conferências, concursos, exposições e obras da década de 1990 serviram como catalisadores para a formulação do discurso teórico do *digital design*. (OXMAN, 2006).

A aplicação de procedimentos na solução de problemas de projeto, envolvendo raciocínio, cognição, algoritmos e linguagem computacional coloca o arquiteto na condição de modelar e criar métodos que atendam suas necessidades, ao invés de estabelecer que o arquiteto é apenas um usuário das ferramentas digitais. Para Terzidis (2009) computação consiste na aplicação de procedimentos lógicos e matemáticos na solução de problemas de projeto, envolvendo raciocínio, cognição e algoritmos. O uso de tecnologias de desenho assistido por computador abriram novas possibilidades de desenho que vem alterando a expressão da arquitetura e do design. (SCHODEK, et al., 2005).

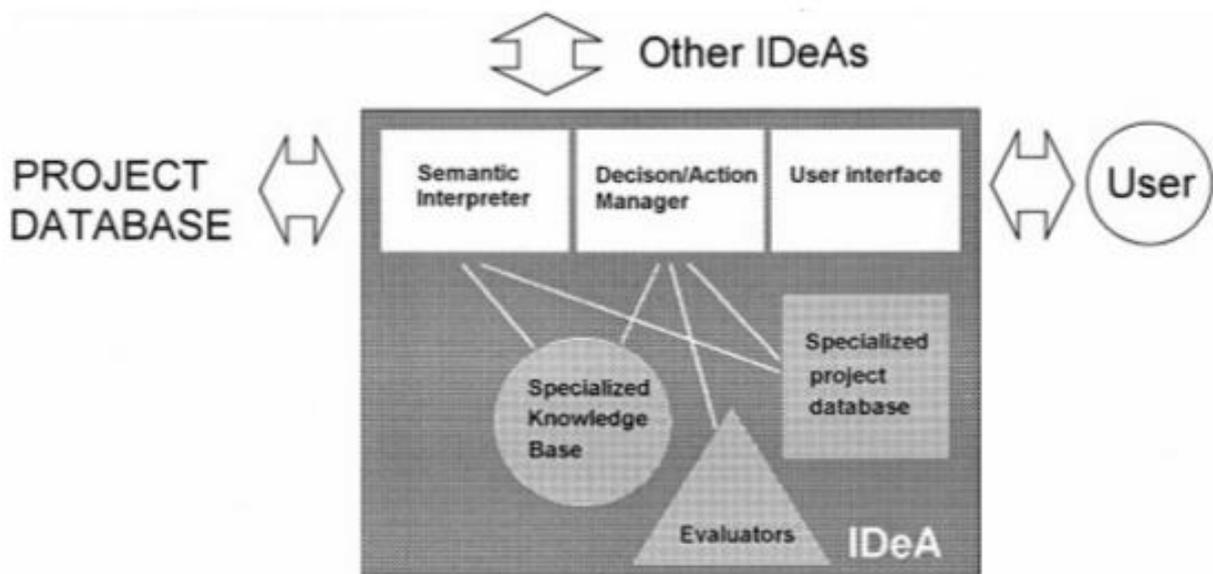
Mitchell (2008) compara a crítica e raciocínio como a resultante de um banco de dados, composto por fatos e regras do mundo projetual. O entendimento do processo projetual como um sistema operativo de solução de problemas na

⁸ Essa mudança da representação de formas para descrição de processos é um conceito fundamental na prática do desenho computacional contemporâneo, pois os programas computacionais seguem as instruções de projeto e remodelam a geometria resultante para diferentes parâmetros de entrada.

arquitetura potencializou-se com o uso de ferramentas computacionais, permitindo o desenvolvimento de novas metodologias no auxílio a resolução de problemas complexos de projeto. A força motriz por trás da atividade projetual, fundamenta-se no desejo de alcançar soluções qualitativas, determinadas por avaliações multicritérios e multidisciplinares. (KALAY, 1999).

O programa proposto por Kalay (1999), The Intelligent Design Assistant (IDeA) consiste em um agente baseado em metas. É um sistema de auxílio à tomada de decisão que armazena regras em um banco de dados, visando cumprir tarefas, conforme um grupo de prognósticos de desempenho (Figura 4). O método pode recorrer a ferramentas de avaliação externas, podendo ser composto por outras metodologias de auxílio específico. Através de um estudo de caso, Kalay avalia soluções para fenestração, utilizando cinco critérios de avaliação: iluminação natural, transmissão acústica, ventilação, permeabilidade visual e custos estimados, auxiliando assim, a tomada de decisões do arquiteto e demonstrando quais os pontos críticos e positivos perante cada alteração realizada.

Figura 4 Estrutura proposta para um IDeA – *Intelligent Design Assistant*.



Fonte: Kalay (1999, p.403)

Assim como o programa IDeA, outras metodologias vêm explorando as potencialidades que ferramentas computacionais podem exercer durante o processo de projeto, ao incorporar o desempenho da forma edificada. Na última década, uma série de projetos vem sendo desenvolvidos, visando à exploração de tecnologias digitais, direta ou indiretamente relacionadas com o processo de projeto. (OXMAN, 2009). A modelagem e aferição do desempenho são potenciais procedimentos de auxílio a tomada de decisões, oferecendo suporte para o arquiteto definir a forma, materiais e relações inerentes ao processo de projeto.

Para Omidfar e Weissman (2012), as ferramentas digitais proporcionam aos designers, o acesso ao conhecimento acumulado pela humanidade, permitindo ampla e profunda compreensão de situações e contextos específicos⁹. O uso da tecnologia computacional vem oportunizando a prática acadêmica e profissional a aprimorar o processo de projeto através da representação, visualização e simulação do desempenho.

1.1.3 Projeto Baseado em Desempenho

A partir da década de 1980, quando os computadores tornaram-se mais acessíveis para universidades e estudantes, ampliaram-se as discussões, publicações e debate sobre a introdução da tecnologia computacional no processo de projeto. Inicialmente as ferramentas computacionais foram utilizadas simplesmente para a representação do projeto, evoluindo progressivamente para a implementação de programas que podem realmente ser integrados ao processo de projeto, possibilitando a geração e exploração de soluções (MARK; MARTENS; OXMAN, 2001), através da antecipação da avaliação do desempenho.

Ao projetar, buscou-se atender aspectos funcionais e técnicos, estabelecidos pelo meio e pelas diferentes áreas envolvidas no projeto. Na busca por soluções eficientes, dentre o campo complexo que integra a interdisciplinaridade do projeto,

⁹ “Today's digital tools provide designers access to the collective knowledge accrued by humanity of the immaterial forces at work in our world, allowing a richer and deeper understanding of specific sites and contexts.” OMIDFAR; WEISSMAN, (2012).

os envolvidos tem o suporte dos ambientes computacionais para aferir o desempenho da forma. A modelagem computacional do desempenho, normalmente é baseada em métodos numéricos complexos que visam reproduzir um modelo real que está sendo planejado ou existente. A complexidade inerente a maioria dos processos de modelagem do desempenho deve-se a procura por modelos de aproximação, o mais fiéis possível à realidade.

O projeto baseado em desempenho fundamenta-se no argumento de que a relação entre forma e função é contextual ao invés de causal, como a noção tradicional dos paradigmas existentes em implementações CAAD. (KALAY; CARRARA, 1996). A abordagem contemporânea para o projeto baseado em desempenho diferencia-se dos processos de simulação convencional, pois as ferramentas tradicionais consistem na análise e simulação de um objeto predefinido, enquanto que os modelos atuais buscam integrar a avaliação do desempenho como um componente ativo do processo de projeto. Deste modo, o processo de modelagem do desempenho enquadra-se na busca por simulações que não se preocupam com a aproximação real de um modelo fiel de análise, mas sim, como um processo evolutivo do desempenho, acompanhando os diferentes graus de complexidade do processo projetual.

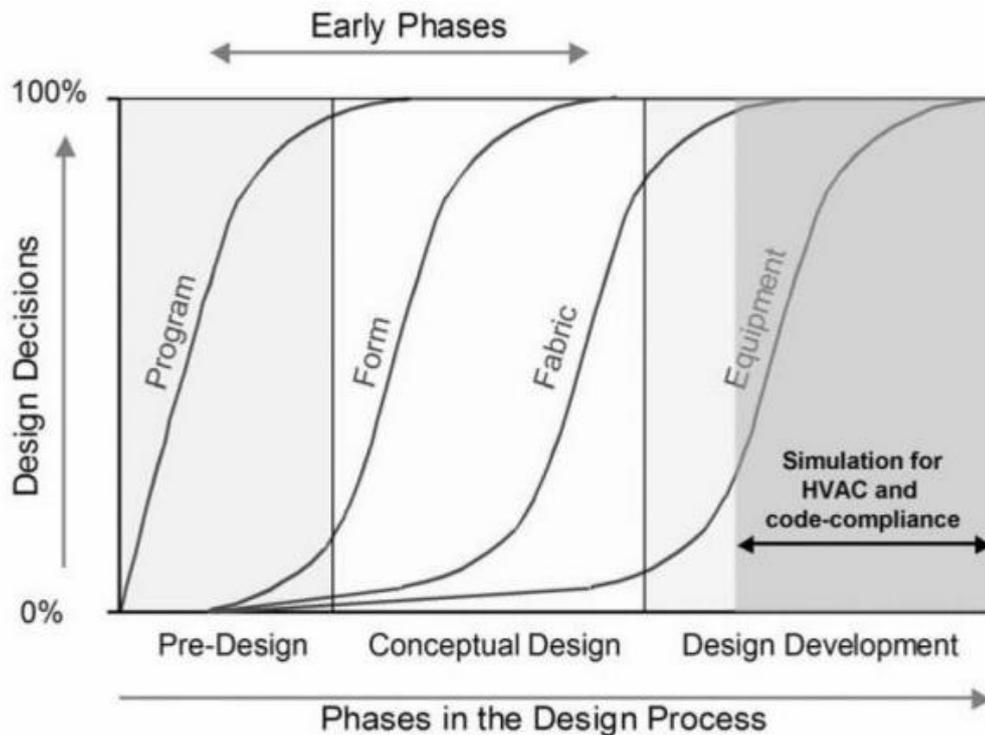
Oxman (2008) define *Performance-Based Design* como uma abordagem em que o desempenho do edifício é o fator que orienta o processo de projeto. Modelos baseados no desempenho consistem na exploração da performance para que a manipulação da geometria possa ser realizadas, visando a otimização das soluções projetuais. Ao considerar a necessidade de integrar o desempenho do edifício com os demais aspectos tratados pelo processo de projeto, o arquiteto visa à incorporação dos aspectos performáticos. Avaliações simulando aspectos quantitativos e qualitativos, como, fatores sociais, culturais, geográficos, tecnológicos (LEATHEARBARROW in KOLAREVIC; MALKAWI 2005) fazem parte das decisões projetuais. O diálogo simultâneo e interativo entre a simulação da forma edificada e sua manipulação é essencial para estabelecer a sistematização do processo projetual e antecipação do processo de avaliação da performance.

O computador pode auxiliar o processo de projeto nas etapas iniciais, através da simulação preliminar do desempenho, estruturando o partido arquitetônico (OXMAN, 2008) que, frequentemente, é embasado pelo conhecimento implícito. As

decisões de projeto sofrem maior influência durante as fases iniciais (PEDRINI, 2003), geralmente guiadas pelas experiências acumuladas na memória, dificultando assim, a avaliação qualitativa e estruturada da edificação. As dificuldades inerentes a avaliação da performance durante as fases iniciais de projeto decorrem das incertezas existentes durante o processo de criação e a escassa quantidade de informações técnicas, requeridas pela maioria dos modelos computacionais de desempenho. Quando o desempenho é aferido em etapas finais do processo projetual, a forma do envoltório já está comprometida com as demais funcionalidades e tecnologias que a mesma deve exercer, tornando as alterações de projeto difíceis e com maior custo.

Para Hensen e Lamberts (2011), analisar o comportamento futuro do edifício durante as fases iniciais do processo de projeto é mais eficiente e econômico do que corrigir problemas quando o edifício já está em uso. No entanto, o que ocorre na prática é a simulação tardia do desempenho (ATTIA e al., 2011), restringindo-se as fases finais do processo de projeto (Figura 5).

Figura 5 Gráfico relacionando as decisões de projeto às fases do processo projetual e simulação.



Fonte: Torcellini e Ellis (2006) apud Hensen e Lamberts (2011).

Ao integrar a análise, fabricação e montagem de edifícios às tecnologias digitais, arquitetos e engenheiros têm a possibilidade de redefinir fundamentalmente as relações entre concepção e produção. (KOLAREVIC; MALKAWI, 2005). A relevância de antecipar o processo de avaliação da performance para os EIP foi evidenciada por Pedrini (2003), Nielsen (2005), Schlueter e Thesseling (2009), Reichard e Papamichael (2005), Lin e Gerber (2013), Attia (2013), Picco (2014), Brigitte e Ruschel (2016).

A simulação computacional aperfeiçoa métodos de projeto (AKSAMIJA, 2013) e auxilia a solução de problemas aninhados. Ferramentas computacionais de modelagem – como *Maya*[®], *Revit*[®], *Rhinoceros*, *CATIA*[®], *Solid Works*[®], *Inventor*[®], *Formit*[®], *Bentley's Generative Components*[®] – e de simulação – como *EnergyPlus*[™], *Vasari*[®], *DOE2*, *Radiance*[®], *Daylight*[®], entre outros – vem contribuindo para o desenvolvimento de projetos mais eficientes, ao associar, analiticamente, a forma arquitetônica ao desempenho. Softwares, que até pouco tempo eram simples ferramentas de representação de desenho, hoje auxiliam o processo de projeto, utilizando modelos de edição para integrar a simulação à exploração da geometria do edifício, reduzindo custos de projeto (AKSAMIJA, 2013), através da avaliação do desempenho energético, lumínico, acústico, térmico, impactos ambientais, entre outros (REICHARD; PAPAMICHAEL, 2005). Tradicionalmente, os dados de entrada destas ferramentas computacionais de aferição sobrevivem de modelos com alta resolução, apoiando decisões relacionadas a etapas avançadas de projeto (PEDRINI, 2003). A exigência de um nível elevado de dados restringe o uso da simulação computacional entre arquitetos.

O uso rarefeito da avaliação computacional em fases iniciais de projeto arquitetônico também ocorre pela falta de interoperabilidade entre ambientes computacionais, exigindo retrabalho para modelar a geometria do edifício. Por outro lado, a complexidade da interface computacional utilizada na análise detalhada de diferentes tipos de desempenho exige que a operação seja realizada por profissionais especializados e não pela equipe responsável pela concepção do projeto (CELANI, 2012). As dificuldades para aplicar a avaliação de performance durante as fases iniciais de projeto decorrem do cruzamento de duas circunstâncias: as incertezas inerentes ao processo de criação e a escassa quantidade de

informações técnicas, requeridas pela maioria dos modelos computacionais de desempenho.

A simulação do desempenho ainda é restrita em EIP envolvendo o ensino e prática arquitetônica. As tentativas de antecipar a simulação da forma, em sua maioria, restringem-se ao uso de ferramentas digitais, ou quando associadas a modelos físicos requerem um processo com maior tempo de projeto e exploração do problema, direcionando-se a prototipagem rápida ou com custos elevados. Florio, Segall e Araújo (2007) exploraram a contribuição da prototipagem rápida no processo de projeto, associando modelos físicos e digitais, as quais concluem ter um papel decisivo durante as resoluções de projeto. Celani (2012) implementou o uso da ferramenta computacional Vasari, para analisar a função “túnel de vento” na requalificação de uma área urbana, com objetivo de avaliar o processo de projeto frente ao uso da ferramenta de simulação em um atelier de projeto. No estudo realizado por Celani (2012), a avaliação do desempenho é associada às decisões de projeto, utilizando apenas ferramentas digitais, enquanto que Florio, Segall e Araújo (2007) vinculam o modelo físico e digital ao processo de resolução do problema, mas não associam a avaliação da performance propriamente dita.

Estudos recentes propõem a integração da análise do desempenho às EIP, para atender diferentes parâmetros e opções de design que possam vir a ter impacto significativo sobre o desempenho final do edifício. (RITTER et al., 2014). Dentre diferentes questões tratadas neste estágio de projeto, o envoltório edificado é um dos elementos cruciais para a avaliação do desempenho da forma arquitetônica, assim como, para a qualidade final do projeto. (STAIB; DÖRRHÖFER; ROSENTHAL, 2008).

1.1.4 Envoltório e Desempenho da Forma Edificada

A arquitetura adota o termo *envoltório* como elemento de separação física entre o edifício e o ambiente, ajudando no controle da temperatura interna e resultando na forma arquitetônica. Dentre as particularidades do envelope, o

conceito de elemento termoregulador que estabelece trocas de calor entre “organismo” e ambiente é análogo aos distintos campos da ciência.

O envoltório, também denominado como a pele do edifício ou envelope construído, desempenha a mesma função que a pele exerce sobre o corpo humano, promovendo um anteparo entre o interior e exterior do edifício. (STAIB; DÖRRHÖFER; ROSENTHAL, 2008). O envoltório objetiva responder forças naturais e humanas (RUSH, 1986), através da proteção contra intempéries, como, chuva, neve, vento, sol, e a segurança do edifício. A edificação passa a atuar como mecanismo de controle das variáveis climáticas, através dos elementos paredes, piso, cobertura, aberturas, portas e janelas, assim como do entorno, impactando no conforto e eficiência energética. Para Brookes e Grech (1990), o envelope é um dos elementos mais críticos da edificação, tendo em vista que, ao mesmo tempo que exerce a separação entre meio interno e externo, é o elemento que configura sua aparência, aspectos ambientais, performance e linguagem. (STAIB; DÖRRHÖFER; ROSENTHAL, 2008).

As cavernas foram os primeiros abrigos utilizados como envelope pelo ser humano, propiciando segurança e privacidade. Os primeiros envelopes construídos variavam de acordo com o clima e materiais disponíveis no local e aos poucos foram incorporando mais conforto e segurança. Os dez volumes do tratado *De Architectura Libri Decem*, escrito pelo arquiteto romano Marco Vitruvius Polião (século I a.C.), descrevem claramente os conceitos de proporção, composição, durabilidade e outras características funcionais e formais do envoltório. Vitruvius não tratava o envelope como pele, mas como um conjunto de elementos distintos (colunas, capitéis, frontões entre outros), configurando diferentes ordens arquitetônicas. Assim como Vitruvius, Leon Battista Alberti estabelece a correlação da estrutura e seus elementos construtivos de vedação como um sistema ósseo; relacionando proporção de elementos e dimensões entre as partes (ALBERTI, 2011), já que o envoltório constituía o sistema estrutural da edificação.

Até a Revolução Industrial, os materiais eram determinados pragmaticamente pela sua utilidade, disponibilidade local ou formalmente pela sua aparência e efeito estético, forma desejada. As construções determinavam a escolha do material, assim como, até o século 19, pode-se considerar que o uso dos materiais era subordinado a questões relativas à forma e função. (ADDINGTON; SCHODEK,

2005). No último século, o envoltório sofreu diversas modificações, deixando de ser considerado como parte da estrutura e passando a cumprir apenas a função de proteger o meio interno do ambiente externo. (LOVELL, 2010). Através da dissociação da função estrutural, ampliou-se a liberdade do arquiteto, permitindo soluções inovadoras que, anteriormente, não eram possíveis. O envoltório passou, então, a ser composto por quatro componentes: paredes/fachadas (revestimentos, camadas de isolamento, impermeabilização), fenestrações (portas, janelas, panos de vidro), piso e cobertura; compondo assim, um conjunto de elementos caracterizados por camadas e materiais distintos.

No relatório da IEA (*International Energy Agency*) publicado em 2003 por Peter Warren, o envoltório é descrito como resultado de uma abordagem sistemática dos elementos e seu desempenho. Warren (2003) propôs uma metodologia para avaliação da eficiência energética do envoltório, relacionando aspectos como a durabilidade, conforto, acústica, umidade e outros, na busca por sistematizar todas as avaliações em um mesmo método. Frente à importância que o envoltório exerce sobre a performance e consumo, o relatório da IEA propôs sistemas para aprimorar o desempenho do mesmo, como, estratégias de alto nível de isolamento em paredes, cobertura, integração de elementos fotovoltaicos e outros; vinculando custos e eficiência para adequação de envelopes existentes ou novas construções.

Considerando a atividade que uma edificação exerce, estabelecem-se parâmetros de conforto ideais para cada função. (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Ao projetar a forma do envoltório e definir os materiais, o arquiteto está gerando um impacto sobre os parâmetros de conforto. A posição das superfícies do envoltório em relação ao percurso solar, a escolha dos materiais, a profundidade e altura dos ambientes, a localização e a dimensão dos planos de ventilação e planos translúcidos podem prejudicar ou aumentar o conforto. Considerando que o planejamento da edificação pode considerar a perspectiva energética desde as primeiras fases do projeto cabe a reflexão sobre o impacto que o envoltório exerce sobre as cargas de refrigeração e aquecimento. Tais cargas, necessárias para a manutenção dos índices de conforto podem variar caso as estratégias do envelope reduzam ou não o gasto energético. (MENDES et al., 2005).

Na última década, é possível identificar a busca da redução do consumo energético através de projetos arquitetônicos. A modelagem e aferição do

desempenho do projeto da edificação nas fases iniciais são procedimentos de auxílio a decisões oferecendo, potencialmente, suporte para o arquiteto definir forma, espaços e materiais da edificação. Em etapas iniciais, quando o envoltório está sendo esboçado, utilizam-se modelos simples de representação, que possibilitam uma visão ampla do projeto. (AISH; PRATAP, 2013). Representações adotadas podem ser compostas por esboços em papel, maquetes físicas ou virtuais, delimitando a forma do envoltório, mesmo que as paredes finas ainda não tenham espessura. (JABI, 2004).

Simulações como da performance energética, podem ajudar a compreender decisões projetuais e avaliar potenciais variações de projeto, como a definição da forma edificada, proporção de aberturas e materiais utilizados. Em fases iniciais, muitos dados necessários para realizar simulações energéticas não estão, ainda, disponíveis. Interfaces atualmente utilizadas para a realização de cálculos e avaliações são pouco intuitivas, representando um obstáculo à concepção em fases iniciais de projeto. (RITTER et al., 2014). A configuração detalhada de modelos de simulação e o tempo de computação necessário vem dificultando a disseminação do uso das tecnologias de simulação em fases iniciais. As dificuldades envolvidas na relação entre o processo de projeto e as tecnologias computacionais passam pela interação entre computador e usuário, a seguir analisada.

1.2 Interação Humano- Computador

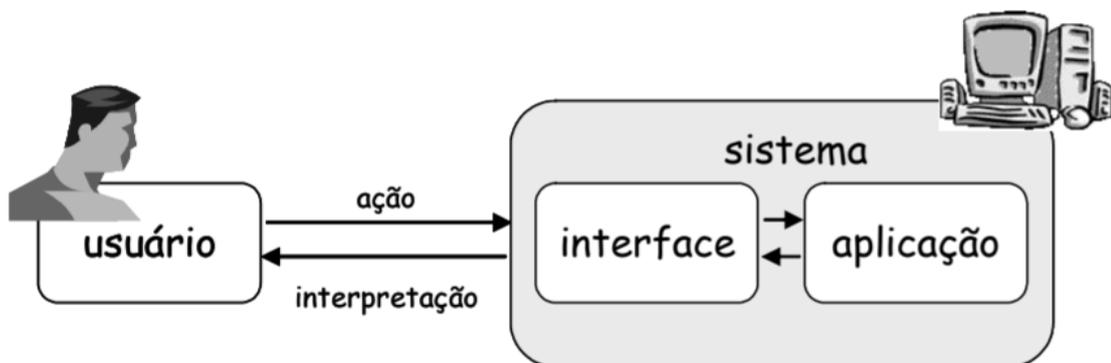
A interação humano-computador (IHC) é uma área da ciência da computação dedicada a estudar as relações entre pessoas e sistemas computacionais envolvendo um amplo espectro de temas como psicologia, ciência cognitiva, ergonomia, sociologia, ciência da computação, engenharia, marketing, design gráfico, inteligência artificial, antropologia e linguística.

O termo IHC é reconhecidamente multidisciplinar, envolvendo conhecimentos sobre: (a) habilidades perceptivas, cognitivas e de resolução de problemas do usuário; (b) ergonomia para entender aptidões físicas; (c) sociologia para auxiliar o usuário na compreensão do contexto da interação; (d) ciência da computação e

engenharia para desenvolver a tecnologia necessária e desejável; (e) marketing para comercialização e (f) design gráfico para apresentar uma interface eficaz e amigável. (DIX et al., 2004). Estudos cognitivos questionam como pessoas compreendem, aprendem, memorizam fatos relacionados ao uso de tecnologias computacionais; aspectos ergonômicos avaliam como os dispositivos de entrada e saída são utilizados; e estudos semióticos analisam processos de representação, ou seja, como os usuários expressam suas intenções e ideias utilizando, individualmente ou coletivamente, o computador.

O termo IHC surgiu em 1980 com objetivo de avaliar como o uso de computadores poderia contribuir para o campo pessoal e profissional, analisando a interação existente entre homem e máquina. O design interativo consiste na criação de experiências que possibilitem ao usuário aprimorar e ampliar a forma como os usuários trabalham, se comunicam e interagem. (PREECE; ROGERS; SHARP, 2002). Heim (2008) define a interação humano-computador como um modelo envolvendo aspectos físicos, virtuais, perceptivos e cognitivos. O processo de interação entre usuário e máquina utiliza uma ou mais interfaces para promover a comunicação entre os elementos do sistema. Para Prates e Barbosa (2003) a interação consiste na ação do usuário sobre a interface de um sistema e interpretações das respostas obtidas (Figura 6).

Figura 6 Processo de interação humano-computador



Fonte: Prates e Barbosa (2003).

1.2.1 Interfaces

A IHC visa o desenvolvimento de interfaces atrativas e de fácil manipulação, que propiciem a redução do esforço cognitivo e percentual de erros. A interface é um componente ativo ou passivo, com o qual o usuário mantém contato com o sistema. (PRATES; BARBOSA, 2003). Souza et al.(1999) define interface como um sistema de comunicação, podendo ser composta por softwares ou hardwares, através de dispositivos de entrada e saída, como mouse, teclado, monitores, impressoras, tablets, entre outros. Para Johnson (2001), a interface refere-se a ambientes computacionais que proporcionam forma à interação entre usuário e computador.

A interação entre usuário e sistema computacional exige esforço cognitivo do usuário, ao executar atividades de interpretação e expressão das informações processadas pelo sistema. (NORMAN, 1986 apud SOUZA et al., 1999, p. 3). A interação de um usuário com o ambiente ocorre por meio de informações recebidas e fornecidas, denominadas entrada e saída – input e output. Em uma interação entre usuário e computador, o usuário recebe informações geradas pelo computador, e responde fornecendo entrada no computador; sendo que a saída do usuário torna-se a entrada para o sistema computacional e vice-versa. (DIX et al., 2004). Os dispositivos de entrada do ser humano são principalmente os sentidos – visão audição e toque – e a saída ocorre através do controle motor de membros – como os olhos, dedos, cabeça, sistema vocal. (DIX et al., 2004).

Na esfera arquitetônica, as ferramentas digitais utilizadas com maior frequência, carecem de funcionalidades e interfaces apropriadas para estágios iniciais de concepção. (BUENO, 2014). O estudo de interfaces adaptativas procura melhorar o modo como ocorrem às interações do sistema computacional. (MCTEAR, 2000). Ao identificar o lápis e o papel como os instrumentos mais frequentes utilizados em estágios iniciais de projeto, Bueno (2014) sugere que a concepção do projeto arquitetônico seja apoiada pela combinação de hardware e softwares amigáveis e intuitivos para sketches¹⁰.

Softwares CAD utilizados com maior frequência para modelagem e simulação baseiam-se na interação do mouse e teclado. (BUENO, 2014). Tal interação causa

¹⁰ Sketches são esboços.

prejuízos para o processo de projeto, motivados pela carga adicional de memória, dificuldade de comunicação e conseqüente diminuição da qualidade de projeto. (BUENO, 2014). Em detrimento destas questões, quando as EIP utilizam ferramentas CAD tradicionais, o processo torna-se lento e, muitas vezes, ineficiente. Visando aprimorar a interação entre raciocínio projetual e representação deste raciocínio, Bueno e Turkienicz (2014) propuseram o uso do *sketch* sobre *touch screen*¹¹, apoiando a vetorização da representação e possível avaliação de desempenho em meio digital.

Artefatos de representação externa como *sketches* e modelos físicos estimulam a imaginação e produção de novas propostas. (FLORIO; TAGLIARI, 2011). Em contrapartida, recursos digitais e intervenções tecnológicas oferecem a exploração de múltiplos campos do saber. (SOUSA; MOITA; CARVALHO, 2011). Para Florio, Segall e Araújo (2007):

Nos últimos anos a profissão de arquiteto tem sido transformada em um híbrido de processos analógico e digital, onde as habilidades e conhecimentos sobre artefatos produzidos manualmente, e aqueles produzidos computacionalmente, têm sido mesclados. Mas já no início dos anos 90 os arquitetos lentamente começaram a usar modelos digitais para desenvolver seus projetos.

Esboços, desenhos técnicos, maquetes físicas e modelos digitais atendem diferentes funções cognitivas, em diferentes fases do projeto. (FLORIO, 2011b). Depois de várias décadas em que o desenho arquitetônico foi dominado por softwares, surgem sistemas e ferramentas híbridas que estruturam-se entre artefatos físicos "reais" e artefatos computacionais (DO; GROSS, 2009), demonstrando potencial em EIP. A tangibilidade dos artefatos reais proporciona forma e significado físico aos recursos e dados computacionais, contribuindo para a resolução dos problemas tratados na concepção do projeto.

¹¹ Touch screen é uma tela sensível ao toque. Consiste em um display eletrônico visual que detecta o toque dentro da área de exibição.

1.2.1.1 Interfaces Tangíveis

O grupo *Tangible Media* do *MIT Media Lab*, coordenado por Hiroshi Ishii, foi um dos precursores no desenvolvimento de interfaces tangíveis – *Tangible User Interfaces* – fornecendo forma física à informação computacional e facilitando a manipulação direta da representação digital. As interfaces desenvolvidas pelo *Tangible Media Group*, como: *I/O BulbandLuminous*, *IlluminatingClay*, *SandScape*, *inFORM*, entre outros, demonstram que, ao utilizar as habilidades físicas de agarrar, tatear e manipular materiais, pode-se auxiliar o processo de projeto, permitindo o aprofundamento do processo de aprendizagem e aumentando a colaboração entre designers e especialistas. (ISHII, et al., 2004).

Para Oehlberg, Lau e Agogino (2009), a tangibilidade exerce papel importante no processo projetual, tendo em vista as contribuições que o dispositivo de entrada exercido pelo tato desempenha durante etapas iniciais do processo. Os efeitos desempenhados pelo ato de pegar, tocar, agarrar e manipular um objeto, afeta diretamente o processo de interação entre usuário e computador, especialmente, em interfaces dirigidas a estudantes e profissionais da arquitetura.

Uma ação simples, como mover uma peça ou botão em resposta à solução de um problema de projeto, envolve processos cognitivos. O estímulo gerado pelo problema é recebido através de receptores sensoriais e transmitido ao cérebro; a questão é, então, processada pelo cérebro, e uma ou mais soluções são geradas. (DIX et al., 2004). A ação está relacionada ao tempo de percepção, reação e movimento, causados pelas características do usuário, sua experiência, conhecimento e habilidades. Se as ações e reações ocorrem em decorrência de estímulos internos e externos (FLORIO, 2011b), a velocidade com que as informações de projeto são processadas pelo cérebro é expressivamente maior do que uma ação, seja ela, exercida através de uma interface tangível, digital ou híbrida (associando modelos físicos e digitais). Para que a interação entre usuário e interface seja eficaz é necessário que as ferramentas computacionais sejam ágeis e velozes, além de amigáveis, de modo que não haja rompimento do raciocínio durante o processo de projeto.

O processo de exploração da forma em EIP guiado exclusivamente por ferramentas digitais pode trazer dificuldades de comunicação entre os envolvidos, como a diminuição da qualidade do projeto pela restrição no universo de soluções e ineficiência de projeto causada pela carga adicional de memória, protocolos de uso e precisão das ferramentas digitais tipo CAD. (BUENO; TURKIENICZ, 2014). A combinação da tangibilidade em estruturas computacionais é avaliada por Schubert et al. (2015) em interfaces que combinam a manipulação de elementos físicos a interfaces digitais. Trabalhos publicados até então não haviam explorado ou avaliado o impacto da integração da forma ao desempenho com suporte de modelos físicos e digitais.

Buscando contribuir com as discussões a respeito da associação de modelos físicos e digitais, este trabalho avalia a contribuição que a associação das ferramentas computacionais *Rhinoceros*, *Grasshopper* e *EnergyPlus*, juntamente com modelos físicos de manipulação podem exercer durante as EIP.

1.2.2 Ferramentas Computacionais em EIP

Nas últimas décadas, o crescente e contínuo desenvolvimento de tecnologias de modelagem digital vem auxiliado no desenvolvimento de métodos de projeto (BURRY, in KOLAREVIC, 2003), viabilizando a associação de interfaces tangíveis e ambientes de simulação em etapas iniciais.

Dentre os ambientes computacionais disponíveis atualmente no mercado – como: *Revit*, *3ds Max*, *Rhinoceros*, *Vectorworks*, *Maya*, *Archicad*, *SketchUp* – que buscam integrar ferramentas e aplicativos de desempenho na plataforma de modelagem. O *Rhinoceros 3D* é a ferramenta que paulatinamente vem se destacando devido a sua interface e capacidade de modelagem, com *plug-ins* e componentes em código aberto. Dentre as potencialidades do *Rhinoceros*, está o *Grasshopper*, ferramenta que permite a manipulação paramétrica da forma e outras variáveis projetuais. Dado que esta pesquisa restringiu-se a utilização do software de modelagem *Rhinoceros*, a fundamentação teórica limitar-se-á a compreender as

funcionamento desta ferramenta de modelagem geométrica, assim como, do *Grasshopper* e ferramentas de integração do mesmo com o software *EnergyPlus*.

1.2.2.1 Rhinoceros 3D como ferramenta de modelagem

O *Rhinoceros 3D*, conhecido como *Rhino* e desenvolvido por Robert McNeel & Associates, é uma ferramenta de modelagem tridimensional ou também referida como modelador híbrido. Disponibiliza a edição, análise, criação, documentação e animação para curvas, superfícies e sólidos NURBS¹², sem limites de complexidade, grau e tamanho. Destaca-se na área do design e arquitetura pela multiplicidade de operações e integração com outros programas de modelagem e simulação.

Existe um amplo grupo de aplicativos disponíveis para *Rhino*, alguns desenvolvidos pela *Robert McNeel* e outros disponibilizados por empresas parceiras que vem auxiliando a disseminar o programa. Dentre os aplicativos, uma ampla gama é disponibilizada gratuitamente, como é o caso do *Grasshopper*. Executado dentro do *Rhino*, o editor de algoritmos gráfico *Grasshopper*, desenvolvido em 2008 por David Rutten e Robert McNeel & Associates, trabalha com uma linguagem de programação visual, que emprega conceitos de algoritmos generativos e desenho paramétrico para explorar a geração de formas¹³. Conseqüentemente, tais programas têm contribuído para avanços sobre o domínio de formas, geometria euclidiana e topológica. (FLORIO, 2011a).

Deste modo, a partir do programa *Rhinoceros* e do *Grasshopper*, pôde-se avançar na sistematização do processo de geração de formas e estratégias de sistematização pois, ao invés de simplesmente operar elementos geométricos, linhas e planos, as operações são executadas sobre parâmetros que subjazem à construção da forma no espaço. (FLORIO, 2011a). Assim, a manipulação topológica dos pontos que constituem os elementos geométricos impulsiona as construções

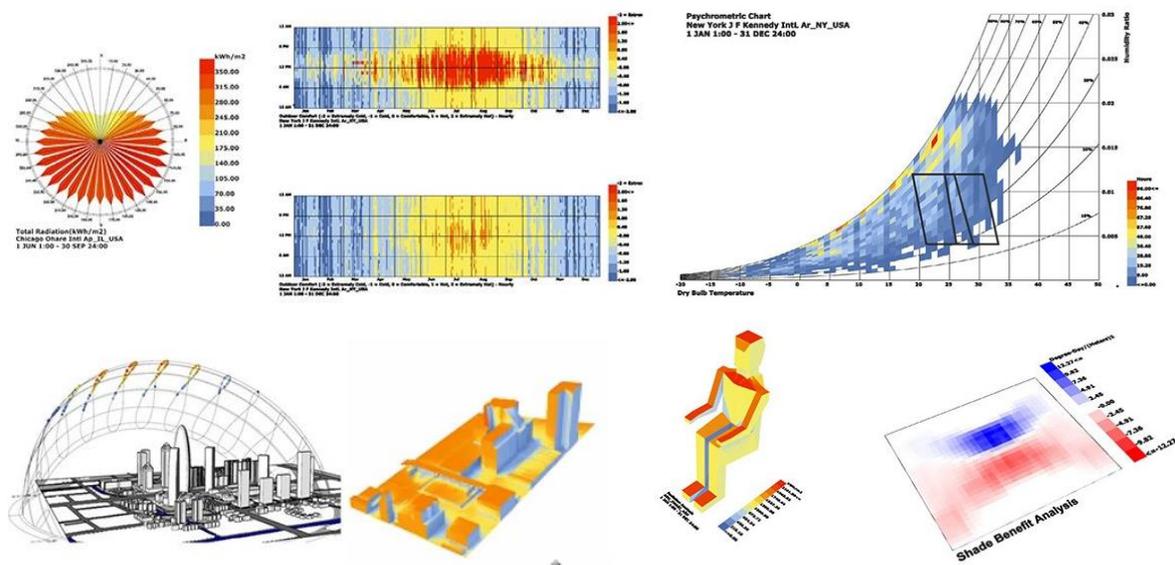
¹²NURBS é a nomenclatura dada para o termo em inglês *Non-UniformRational B-Splines*. É um dos métodos mais populares e bem sucedidos para desenhar superfícies complexas em desenho geométrico assistido por computador. As curvas e superfícies NURBS admitem facilmente o controle da sua forma, através da manipulação dos pontos de controle, mudança dos nós ou mudança de peso (Hu, et al., 2001), também chamado de grau.

¹³ Disponível em: <http://www.grasshopper3d.com/> Acesso em 20 out 2015.

geométricas. A facilidade de operação do *Grasshopper* tem incentivado a produção de componentes de grande complexidade, com parâmetros claramente definidos, possibilitando a interface com outros programas como é a função cumprida pelos componentes *Ladybug* e *Honeybee*.

O *Ladybug* e *Honeybee* foram desenvolvidos por Mostapha Sadeghipour Roudsari para integrarem-se a ferramentas de simulação como o *EnergyPlus*, *Radiance* e *Daysim*. O componente *Ladybug* é um *plug-in* do *Grasshopper3D* em código aberto, que permite importar os arquivos climáticos (EPW) do *EnergyPlus* para o *Grasshopper*, fornecendo um conjunto de gráficos interativos para auxiliar o processo de tomada de decisões durante os estágios iniciais de projeto (Figura 7). O *Honeybee* permite a conexão do *Grasshopper3D* ao *EnergyPlus* e *OpenStudio* com intuito de aproximar as ferramentas de simulação ao conceito paramétrico¹⁴.

Figura 7 Exemplo das representações gráficas e geométricas que o *Ladybug* apresenta para diferentes tipos de análise.



Fonte: Roudsari.¹⁵

O *Honeybee* foi desenvolvido para executar a análise avançada de edificações, disponibilizando um conjunto de valores definidos como padrão, mas

¹⁴ Disponível em: <http://www.grasshopper3d.com/group/ladybug> Acesso em 20 out 2015.

¹⁵ ROUDSARI, Mostapha Sadeghipour. Ladybug + Honeybee. Disponível em: <<http://www.grasshopper3d.com/group/ladybug>>. Acesso em: 12 nov. 2015.

com interface facilitando a manipulação dos dados de entrada. A execução de uma análise no *plug-in Honeybee* consiste em quatro etapas: preparação da geometria (a), verificação do arquivo de entrada (b), execução da simulação (c) e visualização dos resultados (d) (ROUDSARI; PAK, 2013).

(a) A geometria a ser simulada é composta por uma ou mais zonas, definindo assim a interseção entre zonas e superfícies adjacentes. Neste momento, o usuário fornece as alturas entre pisos e o programa dos espaços/ funcionalidades. O *Honeybee* subdivide a zona em várias unidades e atribui um conjunto construído, horários de uso e cargas internas para cada espaço, baseando-se no programa da edificação. Determina-se, então, a porcentagem de aberturas nas respectivas fachadas e orientações solar. (ROUDSARI; PAK, 2013).

(b) O *Honeybee* diferencia-se entre outras ferramentas, pela interface entre importação e exportação, fornecendo ao usuário a possibilidade de visualizar e configurar os dados de entrada e saída do arquivo de simulação no mesmo ambiente (*Rhinoceros/Grasshopper*), antes de executar a simulação. (ROUDSARI; PAK, 2013).

(c) Após configurar os dados de entrada, o usuário pode executar a simulação. Para a simulação energética, deve-se fornecer a localização do arquivo climático, a relação de análises desejadas, diretório de trabalho e nome do projeto. Os usuários também podem adicionar geometrias de contexto como objetos de sombreamento. Para a simulação *daylighting*, o usuário deve indicar superfícies ou pontos a serem testados, assim como, dados de radiação, número de pontos, amostragem, entre outros. O *Honeybee* utiliza como padrão uma geometria idêntica tanto para estudos de energia quanto para estudos de iluminação natural, e extrai as propriedades do material para a simulação de iluminação natural a partir da construção do *EnergyPlus*. Essa técnica simplifica o processo e evita possível erros de entrada do usuário. (ROUDSARI; PAK, 2013).

(d) Por fim, o *Honeybee* importa os dados de simulação possibilitando com que os usuários mapeiem os resultados e geometrias. Os resultados podem ser visualizados de maneiras distintas, selecionando-se o estilo de dados a ser avaliado, como análise climática anual, autonomia diurna, disponibilidade de luz, consumo de energia para aquecer e resfriar entre outras análises que depois podem ter os parâmetros alterados, selecionando-se horas de trabalho, valores anuais, mensais ou diários, períodos específicos, entre outros parâmetros. (ROUDSARI; PAK, 2013).

O *Grasshopper* e a diversidade de componentes e *plug-ins*, associados a ele, têm auxiliado estudantes e arquitetos a operar uma sequência de comandos que os antigos meios de programação não conseguiam. (FLORIO, 2011a). Deste modo, este estudo sugere que a associação de ferramentas de modelagem tridimensional e programas de simulação auxiliem na concepção do envoltório, estruturado desde as fases iniciais por resultados embasados na aferição do desempenho.

1.2.2.2 Ferramentas de auxílio à simulação energética

Devido à quantidade e complexidade das variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares que envolvem a aferição do desempenho em edificações, o uso do computador atua como ferramenta fundamental para aproximar a avaliação estruturada às fases iniciais de projeto.

Como os programas computacionais de simulação requerem grande quantidade de dados (muitos dos quais ainda inexistentes em EIP) estimam-se elementos através de referências teóricas e práticas, na busca pela avaliação prévia do seu desempenho. Ou seja, antecipando o uso das ferramentas de simulação, disponibiliza-se a rapidez e precisão para auxiliar o arquiteto sem a pretensão de encontrar resultados que comprovem o desempenho derradeiro da edificação. Uma questão inerente ao uso de simulações nas primeiras fases do projeto é a inexistência e/ou imprecisão de alguns dados de entrada que esses ambientes de simulação requerem. Programas computacionais e a pesquisa científica vêm avançando no campo da simulação, através de softwares, *plug-ins* e metodologias que incorporam a aferição em EIP, utilizando os dados de entrada disponíveis já nessa fase.

Nos anos 90, o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) passou a disponibilizar um banco de dados online com os softwares para a análise energética disponíveis no mercado. Em 2014, a Associação Internacional *Building Performance Simulation* assumiu a gestão do diretório e a responsabilidade de disseminar as potencialidades, dados de entrada, dados de saída e demais características de análise utilizadas por cada software catalogado. A escassa

quantidade de profissionais brasileiros de arquitetura que utilizam tais programas como ferramentas de trabalho deve-se a complexidade dos softwares e a consequente demora no aprendizado (PEREIRA; GHISI, 2015), causada pela falta de interfaces computacionais amigáveis.

Dentre os softwares computacionais destinados à associação da modelagem e avaliação energética, destaca-se o uso do *SketchUp* e *EnergyPlus*. Essa associação surgiu porque o *EnergyPlus* é um motor de cálculo que não inclui uma interface (PINTO et al., 2014) que represente as geometrias aferidas, dificultando sua manipulação e visualização. Todos os componentes da edificação, desde a geometria das paredes e pisos até o sistema de climatização, devem ser escritos em um arquivo de texto ou em um editor básico de informações, o que Pinto et al. (2014) descrevem como inviável para modelos de projeto arquitetônico. Para aproximar o ambiente de simulação *EnergyPlus*, desenvolveram-se aplicativos como o *OpenStudio* para *SketchUp* e *DesignBuilder*, possibilitando a visualização e manipulação através de interface gráfica digital.

Carvalho (2015) define um modelo, utilizando *EnergyPlus*, *OpenStudio* e *SketchUp*, através dos seguintes passos: (a) criação do edifício no *SketchUp*, definição da geometria, materiais e possíveis elementos de sombreamento, (b) seleção dos dados climáticos no *OpenStudio* disponibilizados pelo website do *EnergyPlus*, fornecendo informações sobre localização, altitude, luminosidade, períodos típicos e extremos, temperatura do solo, temperaturas secas, ponto de orvalho, umidade relativa, pressão atmosférica, radiação solar, direção e velocidade dos ventos e nebulosidade para um ano típico da zona escolhida, (c) definição dos horários de funcionamento dos equipamentos e temperatura dos espaços, (d) estabelecimento da quantidade e potência dos equipamentos e número de pessoas em cada espaço, (e) atribuição de horários, taxa de ocupação, equipamentos e zonas térmicas para cada espaço da edificação, (f) definição das características dos equipamentos instalados nas zonas térmicas, (g) escolha dos sistemas de climatização, (h) por fim, definem-se as medidas que o operador se propõe aplicar e estabelecem-se os tipos de relatórios finais pretendidos.

O domínio que os arquitetos necessitam ter sobre os limites de cada software antes de utilizá-los é crucial para o processo de aferição do desempenho. A avaliação dos atributos, limitações e métodos dos programas de simulação é

necessária para compreender como a antecipação da análise estruturada do envoltório pode contribuir para a sistematização e avanço do processo de projeto, visto que, os softwares possuem plataformas distintas; geralmente desenvolvidas para uso detalhado das fases finais do projeto.

1.2.2.3 *EnergyPlus* como ferramenta de simulação

O programa computacional *EnergyPlus* está disponível para o usuário que desejar modelar o consumo de energia – para aquecimento, refrigeração, ventilação, iluminação e carga energética – ou o uso da água em edificações. É um *software* livre, *em código aberto (open-source)*, podendo operar em sistema *Windows*, *Mac OS X* ou *Linux*¹⁶, ou rodar diretamente no processador do computador. Começou a ser desenvolvido em 1996, a partir dos programas *BLAST* e *DOE-2*, com a colaboração do DOE, CERL (Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Construção do Exército dos Estados Unidos), LBNL (Laboratório Nacional Lawrence Berkeley), da Universidade de Illinois, Universidade do Estado de Oklahoma e *Analytics GARD*. (CRAWLEY et al., 2001). A primeira versão teste foi disponibilizada em 1999, escrita em Fortran 90, tendo atualizações periódicas. A versão 8.4.0 foi à última atualização publicada em 2015, lançando atualizações e algumas alterações do sistema.

Dentre diversas potencialidades do *EnergyPlus*, destacam-se: a integração entre condicionamento de zonas térmicas e sistema HVAC (*heating, ventilation and air conditioning*), soluções baseadas em equilíbrio térmico (efeito radiante e convectivo), predefinição de períodos de tempo, representação do movimento de ar entre zonas, modelos de fenestração avançados, cálculos de brilho e iluminância, estratégias de controle da iluminação e HVAC, interface de importação e exportação acessível, resumo e relatórios detalhados. O programa consiste basicamente em uma plataforma que lê dados de entrada e escreve dados de saída para arquivos de texto¹⁷. As utilidades da plataforma podem ser descritas em 3 áreas: o *IDF*¹⁸- *editor*

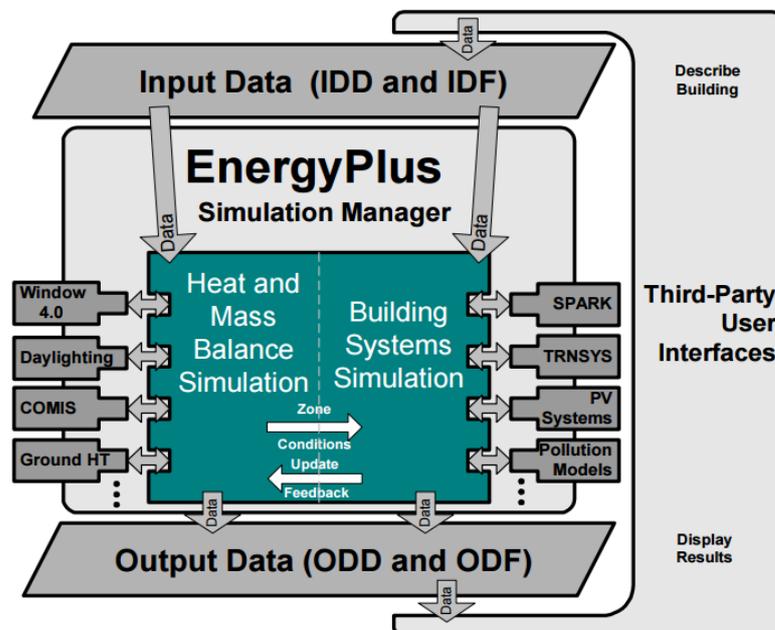
¹⁶ Informações extraídas do endereço digital: <https://energyplus.net/> em 22 out 2015.

¹⁷ Informações extraídas do endereço digital: <https://energyplus.net/> em 22 out 2015.

para a criação de arquivos de entrada, o *EP-Launch* para gerenciar os arquivos de entrada e saída, e executar as simulações, e o *EP-Compare* utilizado para a comparação dos resultados gráficos de duas ou mais análises.

O *EnergyPlus* permite ao usuário agenciar relatórios com dados estimados durante o processo de simulação, incluindo temperatura interna das zonas térmicas, consumo de energia e carga térmica retirada pelo sistema de condicionamento de ar, devido à estrutura do programa – estruturada pelo módulo de simulação do balanço de calor, operador da simulação, e módulo de simulação do sistema da edificação. Deste modo, o sistema permite a adição de novas características ao modelo e o diálogo com outros programas de simulação, como o *Window*, *Slab*, *Trnsys* (Figura 8). Como a plataforma *EnergyPlus* não utiliza instrumento de visualização gráfica surgiram ferramentas mais intuitivas associadas ao programa, como o *OpenStudio*, *DesignBuilder* e *plug-ins* computacionais que auxiliaram a disseminar o uso do programa e aproximar a análise do desempenho e linguagem visual dos arquitetos.

Figura 8 Diagrama da estrutura do programa *EnergyPlus*

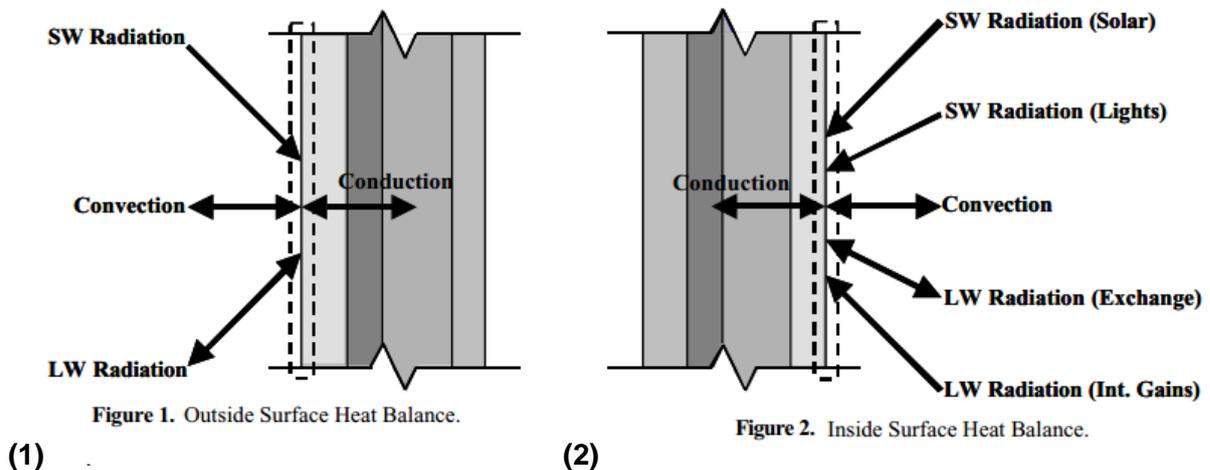


Fonte: Crawley et al. (2001).

¹⁸ IDF é a sigla para Input Data File

Os dados de entrada descritos pelo usuário, características físicas do modelo geométrico, arquivo climático da localização e sistemas estabelecidos, permitem que o *EnergyPlus* calcule as cargas térmicas de refrigeração e aquecimento necessário para manter o conforto térmico, além da mensuração da energia consumida pelo sistema. O conforto térmico de um indivíduo depende, portanto, de como ocorrem as trocas de calor com o ambiente, equacionando assim o balanço térmico do mesmo (FANGER, 1972).

Figura 9 Esquema gráfico dos parâmetros considerados no (1) balanço de energia das superfícies externas e (2) balanço de energia das superfícies internas.



Fonte: Strand, Pedersen e Crawley (2001)

O método utilizado pelo *EnergyPlus* para estabelecer o balanço térmico pondera os processos de transferência de calor por condução, convecção e radiação para as superfícies internas e externas (Figura 9). O balanço de energia das superfícies externas avalia a radiação de onda longa, radiação de onda curta¹⁹, condução e convecção de calor. Enquanto o balanço de energia das superfícies internas considera a convecção, radiação de onda curta absorvida e refletida²⁰,

¹⁹ A radiação de onda curta inclui a radiação solar direta e difusa incidente nas superfícies para o cálculo do balanço de energia das superfícies externas; sendo influenciada pela localização geográfica, inclinação da superfície, propriedade dos materiais, condições climáticas e trocas térmicas.

²⁰ A radiação de onda curta para o cálculo do balanço de energia de superfícies internas considera a radiação distribuída pelas fenestraçãoes e a radiação de fontes internas, como iluminação; sendo distribuída igualmente entre as superfícies.

condução e radiação de onda longa entre superfícies²¹. E quando houver áreas com estratégias de condicionamento distintas, zonas térmicas podem ser criadas para a mensuração do balanço térmico. (STRAND; PEDERSEN; CRAWLEY, 2001).

O *EnergyPlus* foi desenvolvido para simulação e possui interface gráfica para modelagem limitada. Deste modo, as plataformas de modelagem geométrica com interface amigável a arquitetos e designers, como *SketchUp* e *Grasshopper*, vêm adequando-se para compatibilizar essa ferramenta, como é o caso dos *plug-ins* *Ladybug* e *Honeybee*, conforme visto na seção anterior. Dentre as diferentes análises que o *EnergyPlus* disponibiliza, através do *Ladybug* e *Honeybee*, esta pesquisa limitou-se a avaliação do consumo de energia elétrica, para aquecimento e refrigeração do ambiente interno, através da utilização de sistemas ativos de condicionamento do ar.

A presente pesquisa propõe um protótipo de ambiente simplificado de aprendizagem visando à aproximação da simulação do desempenho das edificações das fases iniciais de projeto. A conjunção entre modelos digitais de avaliação do desempenho e modelos físicos de manipulação em um mesmo ambiente projetual pode representar o caminho para que os métodos computacionais de avaliação do desempenho se tornem parte de processos de aprendizagem na medida em que se verifique o aumento da velocidade e da qualidade do processo de projeto.

²¹ A radiação de onda longa contempla a absorção e emissão de radiação por fontes de baixa temperatura, como equipamentos e ocupantes, pessoas.

2 MATERIAIS E MÉTODO

Dado que a avaliação da forma edificada associada ao consumo de energia ainda é aspecto pouco explorado nas fases iniciais de projeto, o estudo propõe um experimento voltado para a tomada de decisões de um grupo de graduandos em arquitetura ao desenvolver uma tarefa típica de projeto com uso comercial.

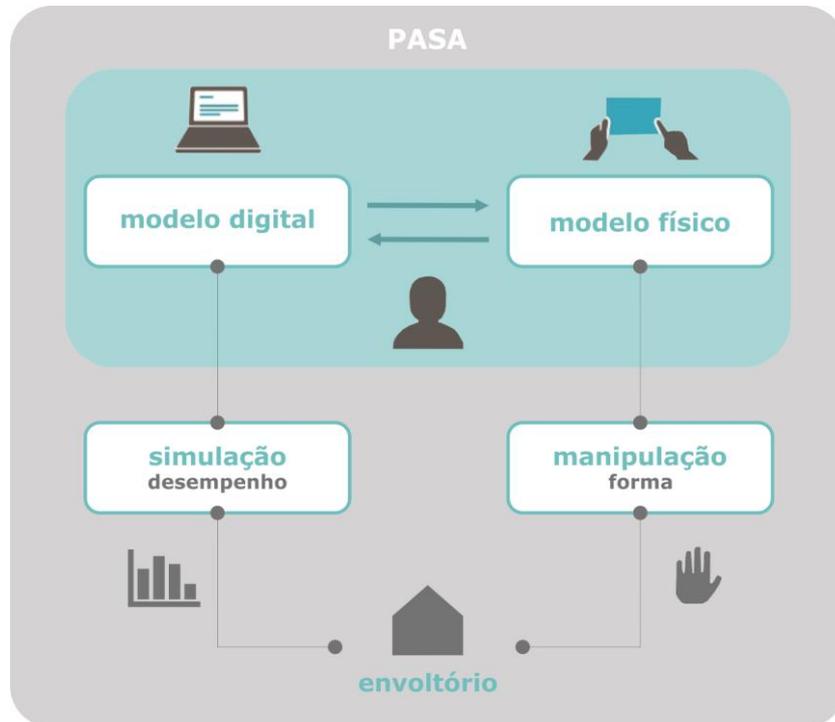
A metodologia proposta utiliza dois modelos, físico e digital. O modelo digital possui uma interface gráfica de visualização das fenestrações (planos opacos e translúcidos) resultados gráficos e numéricos da simulação energética do envoltório; e o modelo físico possibilita a manipulação de fenestrações e alteração das relações espaciais entre volumes que compõem a edificação. Desenvolveu-se uma pesquisa explicativa, conforme definição proposta por Gil (2002), para identificar fatores que contribuem para a ocorrência dos fenômenos comportamentais de um grupo específico de pessoas. O fenômeno observado é o fator tempo e o comportamento das atividades de projeto; o objetivo é identificar as contribuições que a associação de modelos físicos e digitais de desempenho podem exercer em EIP, em relação a atividades baseadas apenas no conhecimento empírico do participante acadêmico.

2.1 Metodologia

Este trabalho propõe uma técnica projetual de fácil acesso e compreensão envolvendo a geração de formas e a simulação do desempenho. A técnica projetual proposta consiste em um protótipo de ambiente simplificado de aprendizagem (PASA) associando modelos físicos a modelos digitais (Figura 10). O modelo físico permite a manipulação tangível dos componentes volumétricos do envoltório, através da definição das relações entre volumes, proporções de planos opacos e translúcidos, aproximando o sentido visual e perceptivo durante o processo de exploração geométrica. O modelo digital captura as alterações físicas, representando a solução e aferindo seu desempenho energético sendo possível

observar digitalmente os resultados gráficos e numéricos, tendo como auxílio o incremento da avaliação energética para as soluções propostas.

Figura 10 Estrutura do protótipo de ambiente simplificado de aprendizagem (PASA)



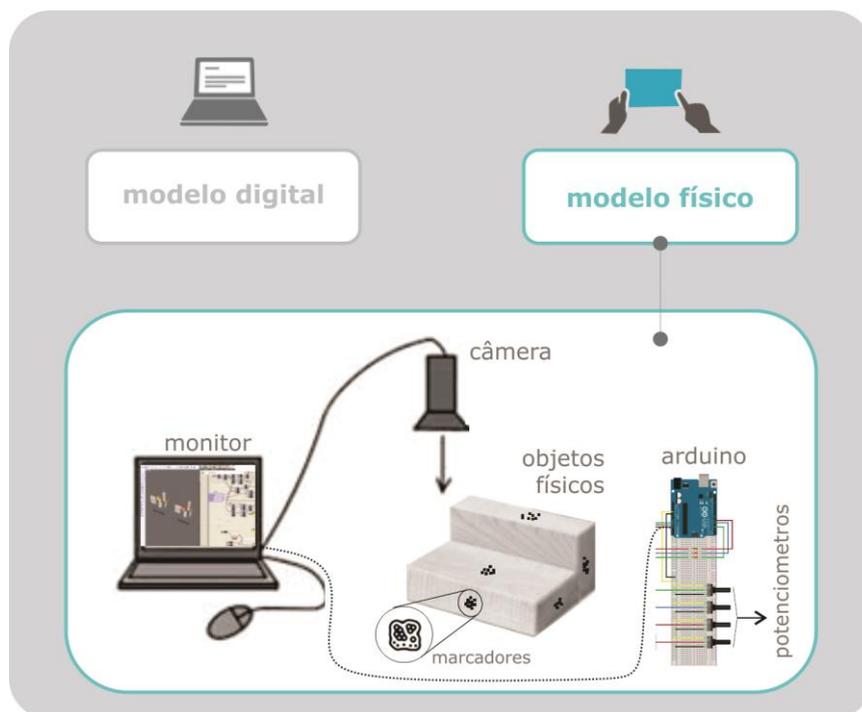
Fonte: elaborada pela autora.

A manipulação da geometria foi guiada por estratégias generativas, estabelecendo relações espaciais através de um conjunto de transformações geométricas, e dados quantitativos, resultantes da avaliação do desempenho energético. Transformações geométricas do tipo escala, rotação e translação conduziram o processo de exploração da forma arquitetônica através de um processo heurístico, não linear. A metodologia combina as transformações geométricas como estratégia para parametrizar a relação entre elementos do modelo físico e digital e auxiliar os processos mentais que o usuário necessita estabelecer para definir a forma.

2.1.1 Modelo físico

O modelo físico consiste na implementação da interface de manipulação da forma, o qual parâmetros e restrições são impostos para sistematizar as transformações geométricas do envoltório. O ambiente físico é composto por monitor, uma base de delimitação, elementos tridimensionais em escala reduzida contendo marcadores em suas faces, uma câmera e um painel com potenciômetros²² (Figura 11). Os elementos em escala reduzida são detectados pela câmera, enquanto os potenciômetros, que permitem a alteração das fenestrações, são decodificados pela plataforma arduino²³, realizando a entrada digital dos dados, expressos pelos monitores que compõem o modelo físico (Figura 12).

Figura 11 Elementos que compõem o modelo físico



Fonte: elaborada pela autora.

²² Potenciômetro é um componente eletrônico de resistência elétrica ajustável, com terminais que possibilitam que o componente atue como um divisor de tensão. É um botão simples, que pode ser lido na placa arduino como um valor analógico. Ao girar o potenciômetro, altera-se a quantidade de resistência, enviada como informação ao arduino. (Fonte: <https://www.arduino.cc/en/tutorial/potentiometer>).

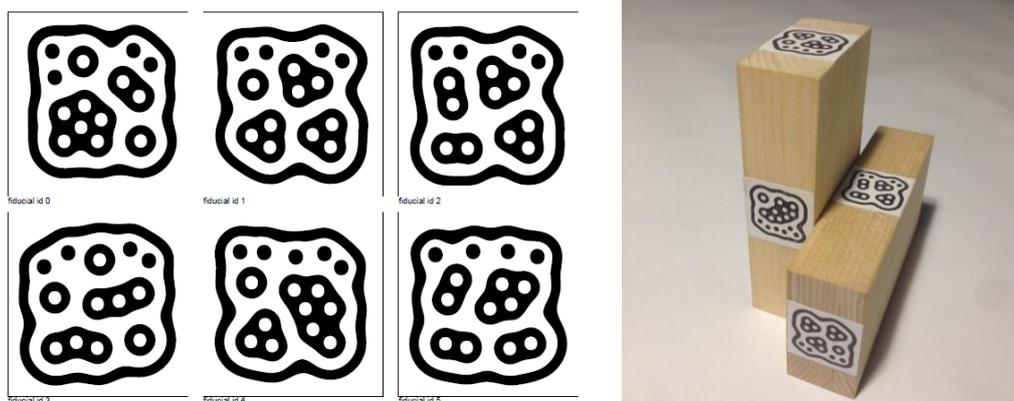
²³ Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre, *open source*, de baixo custo e facilmente utilizável por profissionais em geral e amadores. A plataforma é composta por um microcontrolador Atmel AVR, com suporte de entrada e saída e linguagem de programação com origem em Wiring, sendo essencialmente C/C++ (Fonte: <https://www.arduino.cc/>).

Figura 12 Modelo físico



Fonte: fotografia da autora

Os marcadores utilizados no modelo físico (do tipo *Fiducial Marker*²⁴) são representações impressas em adesivo e fixadas no centro das faces do objeto (Figura 13), para que o modelo digital possa “ler” as transformações geométricas que serão realizadas no ambiente físico.

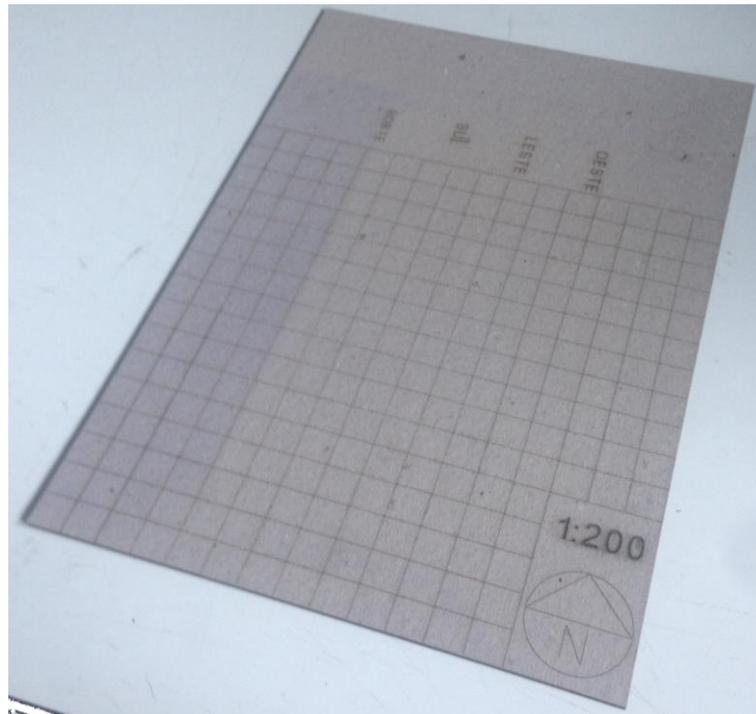
Figura 13 Exemplo de marcadores – *Fiducial Marker*

Fonte: <http://reactivision.sourceforge.net>

²⁴ *Fiducial marker* são códigos de representação que permitem a identificação digital por imagem.

A movimentação do modelo físico é delimitada por uma base em papel Paraná em escala 1/200 em que é feita a impressão de uma malha bidimensional de 3x3m e a representação do norte geográfico (Figura 14), simulando um lote urbano. A delimitação da base corresponde ao ângulo de abertura da câmera²⁵ que captura os elementos físicos.

Figura 14 Base de delimitação do ambiente físico



Fonte: fotografia da autora

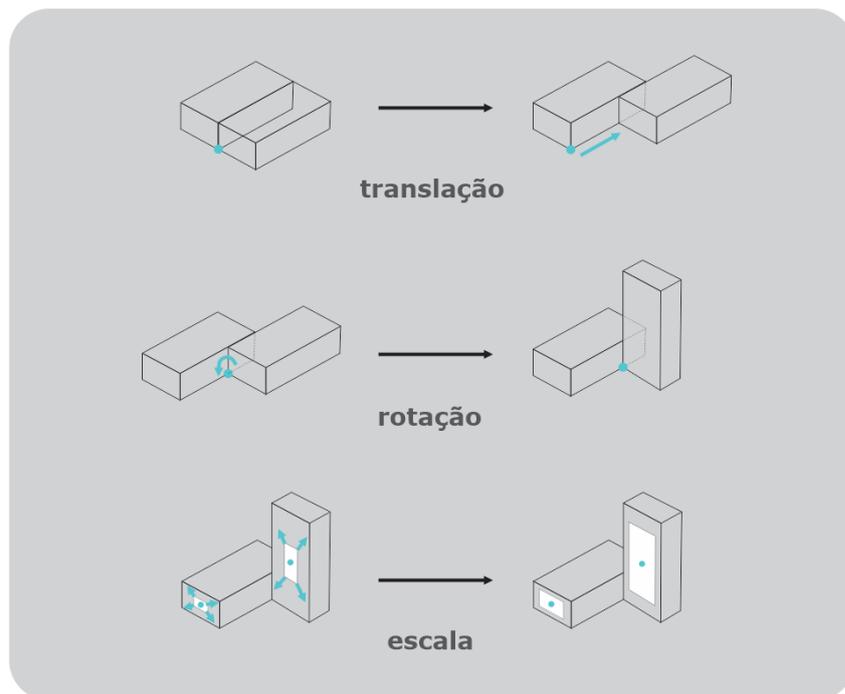
As transformações de posicionamento dos elementos tridimensionais foram rotação e translação e a proporção entre planos translúcidos e opacos (Figura 15), constituindo uma relação de cheios e vazios das fachadas norte, sul, leste e oeste. A translação dos elementos tridimensionais ocorreu no plano “xy” em relação à base; a rotação nos eixos “x” “y” e “z” e as mudanças de proporção em todos os planos verticais (fachadas).

Determinou-se que os elementos tridimensionais deveriam estar conectados, em alguma das faces, com dimensão mínima de um módulo (conforme a malha da base), possibilitando a circulação entre zonas. Ao restringir a conexão entre os

²⁵ Como a câmera que captura a imagem dos marcadores, tem um ângulo de abertura específico, torna-se necessário a delimitação e restrição do espaço físico, garantindo assim a leitura do modelo.

volumes permitiu-se que o modelo digital de desempenho utilizasse uma zona única como base de cálculo, otimizando o tempo de processamento da geometria. O modelo teve como premissa que os volumes não pudessem ser sobrepostos, restringindo o empilhamento²⁶ das peças e preservando a comunicação dos marcadores. Posicionados na face superior dos elementos físicos os marcadores são decodificados pelo modelo digital, permitindo a leitura digital do posicionamento (coordenadas) do modelo físico.

Figura 15 Transformações geométricas propostas para o modelo físico



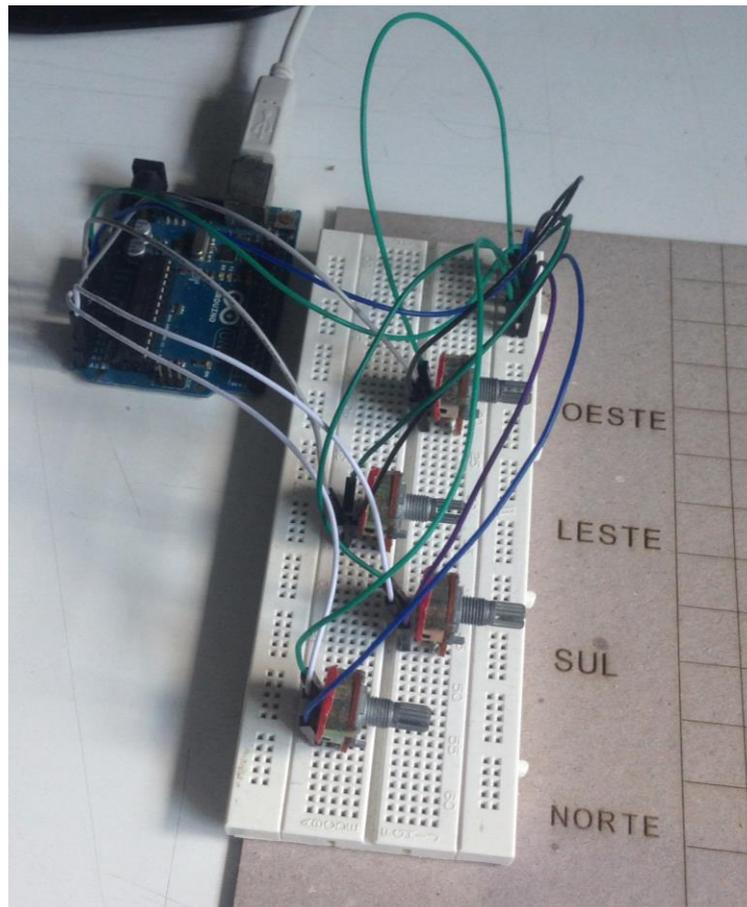
Fonte: elaborado pela autora

A manipulação da proporção entre planos opacos e translúcidos (fenestrações) foi realizada fisicamente e visualizável em ambiente digital (monitor). As aberturas foram configuradas a partir de um ponto de origem central em relação às faces verticais, através de quatro potenciômetros, um para cada orientação de fachada da edificação. O *potenciômetro* é um elemento físico que se comunica com

²⁶ Para permitir o empilhamento, a metodologia necessitaria de outra técnica de comunicação entre modelo físico e digital, como sensores de presença ou movimento. Como o ambiente elaborado restringe os movimentos de empilhamento, desconsiderou-se o uso de outros sensores, mantendo a manipulação da forma do envoltório, através da translação e rotação dos objetos físicos apenas.

o modelo digital através do microcontrolador *Arduino*²⁷, para estabelecer a proporção das fachadas leste, oeste, norte e sul (Figura 16). O giro do potenciômetro corresponde a orientação de fachada desejada, permitindo aumentar ou reduzir a proporção das aberturas.

Figura 16 Plataforma arduino e potenciômetros



Fonte: fotografia da autora

A *breadboard*²⁸, denominada placa de ensaio ou matriz de contato, (elemento branco da Figura 16) permitiu a montagem dos potenciômetros, gerando um circuito eletrônico entre os orifícios da placa de ensaio e a placa *Arduino*. A placa de ensaio

²⁷ A placa arduino utilizada foi o modelo Uno R3, com dimensões 6,8 x 5,3cm, conector USB para conectar-se com o computador, associada a um microcontrolador ATmega328P. O Microcontrolador ATmega328P é um componente eletrônico, de arquitetura RISC, *Reduced Instruction Set Computer*, composto por um circuito integrado, que contém um núcleo de processador, memória e periféricos programáveis de entrada e saída. (Fonte: <http://www.atmel.com>).

²⁸ *Breadboard*, ou *Protoboard*, é um dispositivo eletrônico que não requer solda, sendo utilizado por protótipos temporários para interligar componentes eletrônicos, inserindo cabos ou terminais nos orifícios da placa, e formando um circuito eletrônico. (Fonte: <https://www.arduino.cc/en/Main/Standalone>)

utilizada tem 830 pontos, permitindo espaçamento considerável para que a mão do usuário possa girar os potenciômetros sem influenciar as demais ligações, potenciômetros e cabos conectores. O uso da plataforma *Arduino*, associando a matriz de contato e potenciômetro, permite que as fachadas sejam alteradas individualmente em tempo real. Sempre que realizada a manipulação do potenciômetro, o computador, simultaneamente, altera a proporção entre cheios e vazios da fachada.

Visando restringir o intervalo numérico dos potenciômetros, estabeleceram-se como parâmetros de alteração os percentuais: 0%, 25%, 50% e 75% como intervalos de associação entre planos opacos e translúcidos. Desse modo, os planos de fachada puderam suprimir superfícies translúcidas ou atingir 75% de fenestração em cada fachada da edificação. O intervalo numérico deste parâmetro foi estabelecido, visando alterações significativas de performance, para que a diferença numérica e visual dos dados energéticos fosse facilmente perceptível ao comparar soluções simuladas. A opção de anular o plano de abertura em alguma fachada foi possível, considerando que pode haver compensações nas proporções oferecidas em outros planos de fachada. A proporção das aberturas foi manipulada utilizando programação computacional, através do software Grasshopper. Componentes construtivos, elementos estruturais, entorno urbanístico, vizinhança, vegetação e mobiliário urbano não fazem parte do modelo²⁹.

Como será descrito na próxima seção, o modelo de desempenho utilizado pela metodologia é simplificado, considerando apenas uma zona térmica³⁰ e mantendo a representação simplificada dos planos translúcidos e opacos de fachada, para reduzir o tempo computacional e processamento dos cálculos de performance.

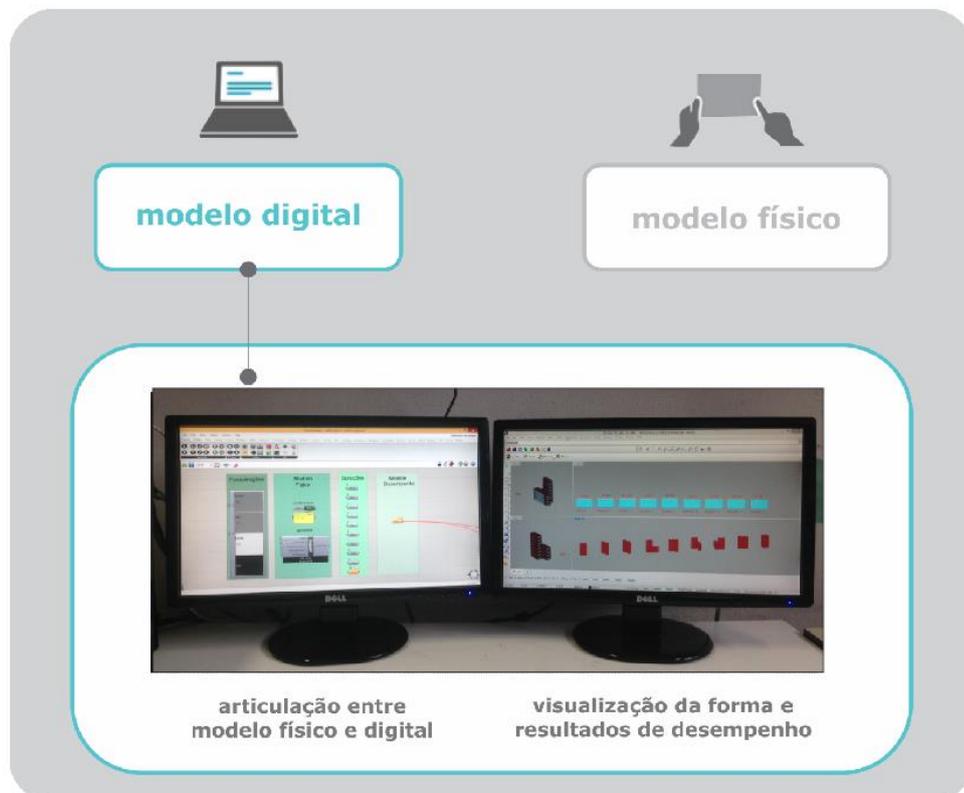
²⁹ Como um dos grandes desafios para implementar modelos de desempenho em EIP é o tempo de processamento dos dados, tais elementos não fazem parte da simulação para manter a velocidade e fluxo do cálculo para uma simulação simplificada.

³⁰ Zona Térmica é o termo utilizado para definir o espaço (área e volume) que o modelo de simulação considera ao realizar a simulação do desempenho.

2.1.2 Modelo digital

O modelo digital captura o modelo físico, simula o consumo de energia, representa gráfica e numericamente as fenestrações e permite a visualização dos resultados. A partir dos dados de entrada fornecidos pela câmera *webcam* e plataforma eletrônica *Arduino*, o modelo digital associa o modelo geométrico originado no modelo físico a um modelo de simulação do desempenho (Figura 17). O modelo geométrico representa digitalmente dados e formas capturadas no modelo físico. E o modelo de simulação do desempenho adota a avaliação do consumo de energia para aquecer e refrigerar a zona térmica estabelecida pelo modelo geométrico.

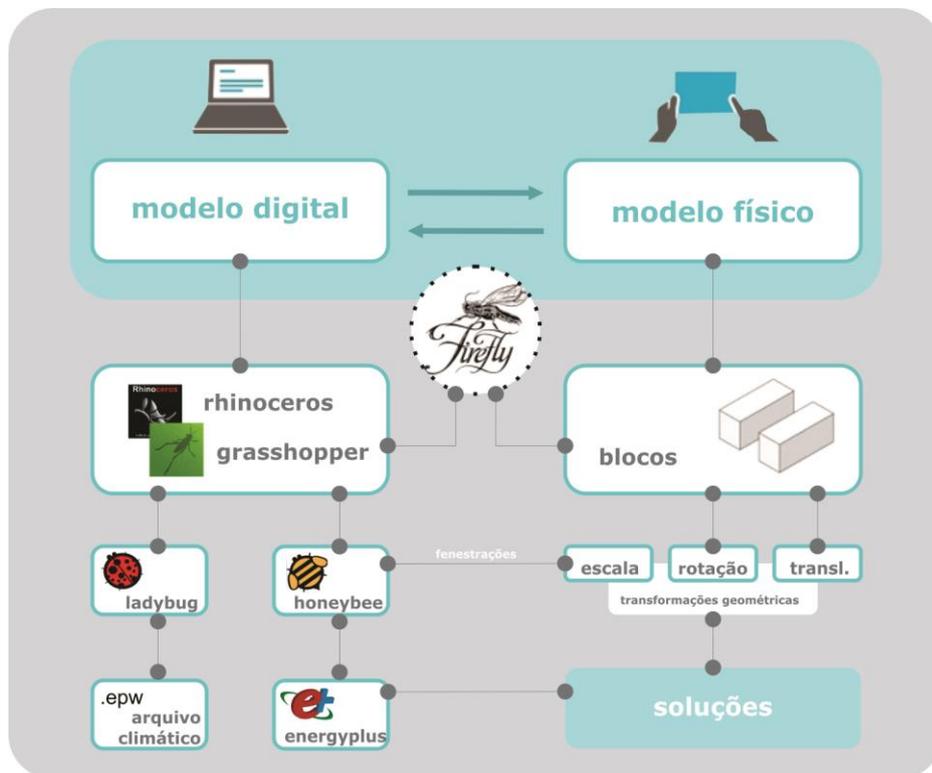
Figura 17 Estrutura do modelo digital



Fonte: elaborado pela autora.

A estrutura de software do modelo digital é composta por um grupo de ferramentas computacionais que em conjunto permite a comunicação entre ambiente físico e digital. O PASA utiliza as ferramentas computacionais: *Rhinceros 3D*, *Grasshopper* e *EnergyPlus*, juntamente com os *plug-ins*: *Honeybee*, *Ladybug* e *Firefly* (Figura 18).

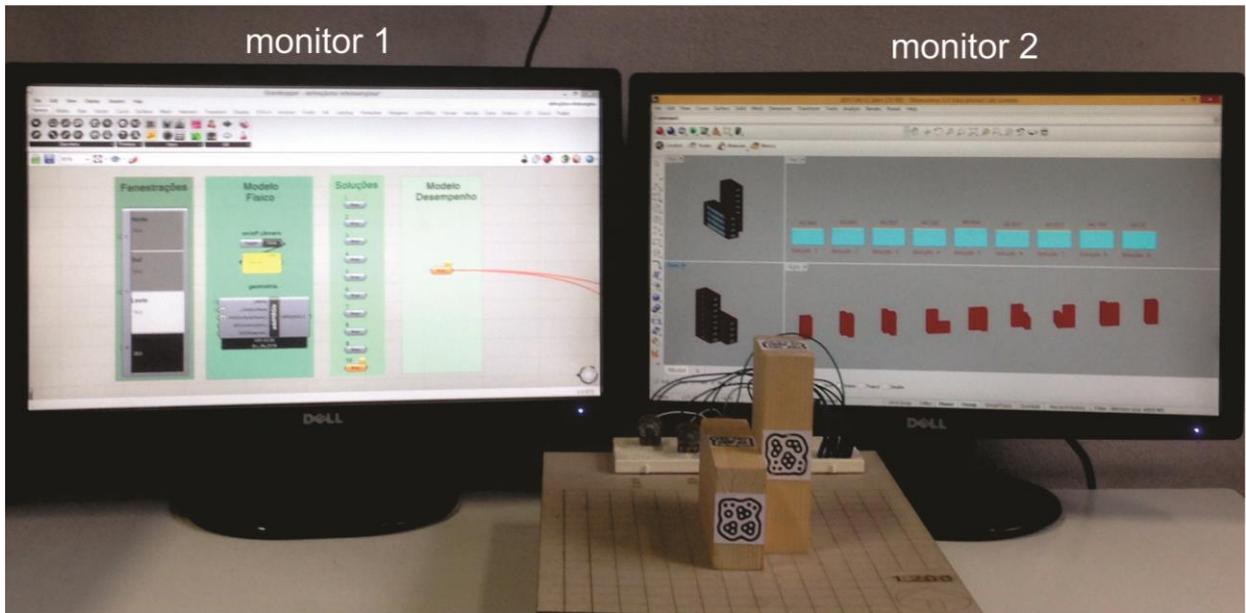
Figura 18 Diagrama do fluxo das ferramentas computacionais que realizam a associação entre modelo físico e digital



Fonte: elaborado pela autora.

A associação do modelo físico ao modelo digital utilizou o *plug-in Firefly* do *Grasshopper*, que permite o fluxo de dados em tempo real entre ambiente digital e físico, através dos dispositivos de entrada (*webcam* e *Arduino*). Através dos marcadores tipo *Fiducial Marker*, a câmera capta a posição dos elementos e reporta para o *Grasshopper* as informações representadas nos dois monitores. O monitor nº1, localizado a esquerda do usuário representa os parâmetros e representações do *Grasshopper*, enquanto o monitor nº2, à direita do usuário, utiliza o *Rhinceros* como ambiente de representação (Figura 19).

Figura 19 Monitores utilizados para representação digital



Fonte: elaborado pela autora.

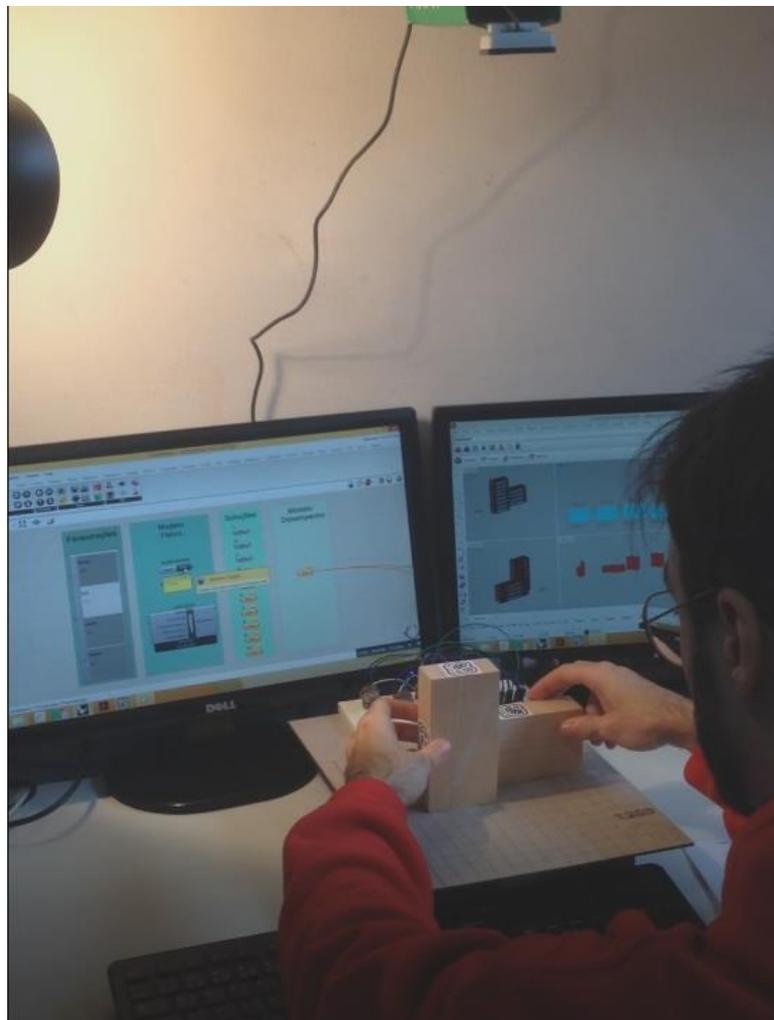
No monitor 1, o usuário pode visualizar os dados numéricos, referente à porcentagem de aberturas manipuladas nos potenciômetros do modelo físico, além de constituir o ambiente de simulação, onde o cálculo de desempenho energético é feito. No monitor número 2, o usuário pode verificar nos quadrantes superior e inferior, a reprodução digital da geometria capturada pelo modelo físico, respectivamente, através das perspectivas sudoeste e nordeste, disponibilizando assim a visualização do envoltório e fenestras das quatro fachadas.

No quadrante superior direito do monitor 2 são demonstrados os valores totais de consumo de energia anual para aquecer e resfriar a edificação, sendo representados em um gráfico de barras verticais (Figura 19). O gráfico de barras representa em azul a proporção de gasto energético para resfriar e em amarelo o consumo para aquecer o ambiente interno. Como os dados são representados cumulativamente, cria-se um gráfico demonstrando as soluções energéticas aferidas, conforme a sequência de decisões adotadas como estratégia para minimização. Abaixo do gráfico de barras, no quadrante inferior direito do monitor 2, pode-se visualizar a representação gráfica em perspectiva correspondente a cada avaliação realizada. Deste modo, o usuário pode observar as soluções aferidas ao longo do processo heurístico, estabelecendo uma relação entre as opções com

menor consumo energético e sua respectiva configuração geométrica e proporção de aberturas.

O PASA permite que as alterações geométricas do envoltório, realizadas no modelo físico sejam visualizadas instantaneamente no monitor (Figura 20). A cada manipulação física realizada, durante o procedimento heurístico, a geometria pode ser visualizada no monitor 2, automaticamente, sendo atualizada a cada cinco segundos.

Figura 20 Registro do uso do PASA



Fonte: fotografia da autora.

A avaliação energética é requerida pelo usuário com o uso do mouse e teclado, e tendo como interface o monitor 1. Sempre que julgar adequado ou

necessário, o usuário solicita a simulação da performance através de quatro etapas procedimentais, realizadas através do aplicativo *Grasshopper*.

(1) Primeiramente, o usuário **salva a geometria elegida** para avaliação dentro de um componente denominado solução. Esse procedimento é realizado ligando um componente ao outro com o uso do mouse. A ligação ocorre através de um click contínuo na saída do componente geometria e arrastando a linha de conexão até a entrada do componente solução.

(2) Em seguida, clica-se com o botão direito no componente solução e seleciona-se a opção ***internalize data***. O procedimento *internalize* é necessário, pois **desvincula o processo de atualização contínua da forma física no ambiente digital**. Ou seja, se o comando *internalize* não é realizado, o *EnergyPlus* processará a performance infinitamente, pois compreende que a cada envio de imagem que a câmera realiza a forma precisa ser reavaliada. Em caso de processamento contínuo, o programa não permite nenhuma interferência, sendo necessário reiniciar todos os softwares utilizados.

(3) A terceira etapa, após o comando *internalize*, consiste na **desativação do componente câmera**. Ou seja, desliga-se a webcam, para que o processo de avaliação da forma ocorra com velocidade.

(4) Para iniciar o procedimento de avaliação energética, o usuário deve **conectar o componente “Solução” ao Modelo de Desempenho**. A ligação entre os dois componentes ocorre do mesmo modo que na primeira etapa: clica-se na saída de um componente e conecta-se a entrada do outro. O processo de simulação é então realizado pelo *EnergyPlus*, com duração de 40 a 60 segundos, e os resultados são expressos em gráfico cumulativo, demonstrando o valor total que o consumo energético representa em cada solução testada. Após a representação do resultado visível no monitor nº2, o usuário pode reiniciar as alterações físicas e o processo de avaliação da forma quando almejado.

Para manter um fluxo de dados e representação gráfica rápida e ágil, o modelo de desempenho adotado foi simplificado, sendo modelado através de zona térmica única. Desconsiderou-se as compartimentações internas do edifício, assim como a delimitação de espaços de circulação e zonas de menor ocupação. Deste modo, os dados de entrada para a simulação seguem o mesmo padrão de zona para toda a metragem quadrada da edificação em análise.

A avaliação simplificada adota, como dados de entrada, a geometria determinada no modelo físico e parâmetros recomendados pela ASHRAE Handbook (2013) e outros parâmetros *default* do *EnergyPlus* e *Honeybee*, baseando-se na tipologia e uso comercial. Os ganhos internos adotados foram: 8,1 W/m² de densidade de iluminação (ASHRAE Handbook, 2013) considerando como base edificações comerciais de planta livre; 5,38 W/m² para a carga de equipamentos, considerando uso médio de 11,6 m²/workstation, 50% laptop e 50% desktop, uma impressora a cada 10 pessoas (ASHRAE Handbook, 2013); 0,00022 m³/s.m² de taxa de infiltração de ar, ponderando uma edificação com ótima taxa de vedação, conforme padrão (*default*) do componente do *Honeybee*; 15m² por pessoa, considerando índice de ocupação de 0,065 pessoas por metro quadrado (ASHRAE Handbook, 2013). O período de ocupação foi estipulado ponderando o uso comercial, das 8:00 às 12:00 horas e das 13:00 às 18:00 horas, períodos com maior ocupação de pessoas em atividade leve. O quesito ocupação considerou como dias de maior ocupação os dias úteis da semana, ou seja, de segunda-feira a sexta-feira, com exceção dos feriados nacionais. A faixa de temperatura de *setpoint* adotada para o sistema de condicionamento do ar foi entre 20°C e 24°C, ou seja, o sistema adiciona calor no ambiente quando a temperatura deste estiver abaixo de 20°C, e retira calor quando a temperatura estiver acima de 24°C. Enquanto a temperatura interna do ambiente edificado estiver no intervalo de temperatura do set-point, não foi considerada a utilização do sistema de ar.

Considerando que a maior parte das edificações comerciais utiliza sistemas de ar condicionado para manter o conforto térmico, optou-se por desconsiderar a ventilação natural e avaliar isoladamente o gasto energético utilizado pelo sistema de condicionamento do ar. O sistema de ar condicionado utilizado no modelo foi VAV³¹ (*Variable Air Volume*) tendo em vista a aceitação consolidada no mercado brasileiro para edificações comerciais (DUARTE, 2014).

³¹ O sistema de climatização com central de água gelada e distribuição de ar com volume de ar variável, denominada VAV, visa reduzir o consumo energético durante períodos de funcionamento em carga parcial, promovendo a temperatura constante em espaços condicionados, variando o volume de ar, ao invés de variar a temperatura do ar fornecido (OKOCHI, YAO; 2016). Esse sistema de ar condicionado modula a rotatividade do motor de ventilador de insuflamento, por inversor de frequência, variando a vazão e mantendo a pressão estática no duto, propiciando assim, a vazão de área necessária para as zonas condicionadas, de acordo com a demanda de carga térmica (DUARTE, 2014). Outro sistema de ar condicionado, também, poderia ter sido avaliado, como sistema PTHP, PTAC, VRF ou *Ideal Air Loads*, no entanto, optou-se por restringir o modelo de desempenho a apenas um tipo de sistema de condicionamento de ar. Deste modo, trabalhos futuros poderão avaliar a metodologia sob o ponto de vista do desempenho e diferentes sistemas de condicionamento do ar, tendo em vista

Para executar o modelo simplificado necessitou-se, também, de uma delimitação dos materiais do envoltório. Nos primeiros estágios de projeto, habitualmente, os materiais ainda não estão sendo pensados pelo arquiteto. Visto que os materiais são determinantes na simulação energética, foi arbitrado um padrão para a composição dos materiais do envoltório analisado. O padrão definido para as paredes é composto por camada de 20cm de tijolo + 5cm de placa de isolamento + camada de ar com resistência térmica $0,15\text{m}^2\text{k/W}$ + 1,9cm de painel de gesso; o piso consiste em uma placa acústica de 1,9cm + camada de ar com resistência térmica: $0,18\text{m}^2\text{k/W}$ + 10cm de concreto leve; a cobertura possui 10cm de concreto leve + camada de ar com resistência térmica $0,18\text{m}^2\text{k/W}$ + telha acústica 2cm e, para as fenestraçãoes, atribuiu-se vidro duplo 3mm e 13mm de camada de ar. O *Grasshopper* disponibiliza uma interface, através de *sliders*³², que propicia a rápida e intuitiva manipulação de qualquer parâmetro. Desse modo, materiais podem ser facilmente manipulados pelo usuário. O PASA limita-se a manipulação do envoltório, desconsiderando a alteração dos seus materiais, sistemas de ar condicionado e localização geográfica; lacunas que podem ser exploradas por trabalhos futuros, adotando o ambiente simplificado de aprendizagem e alterando os atributos da estrutura geométrica ou parâmetros e restrições do modelo de desempenho do *Grasshopper*.

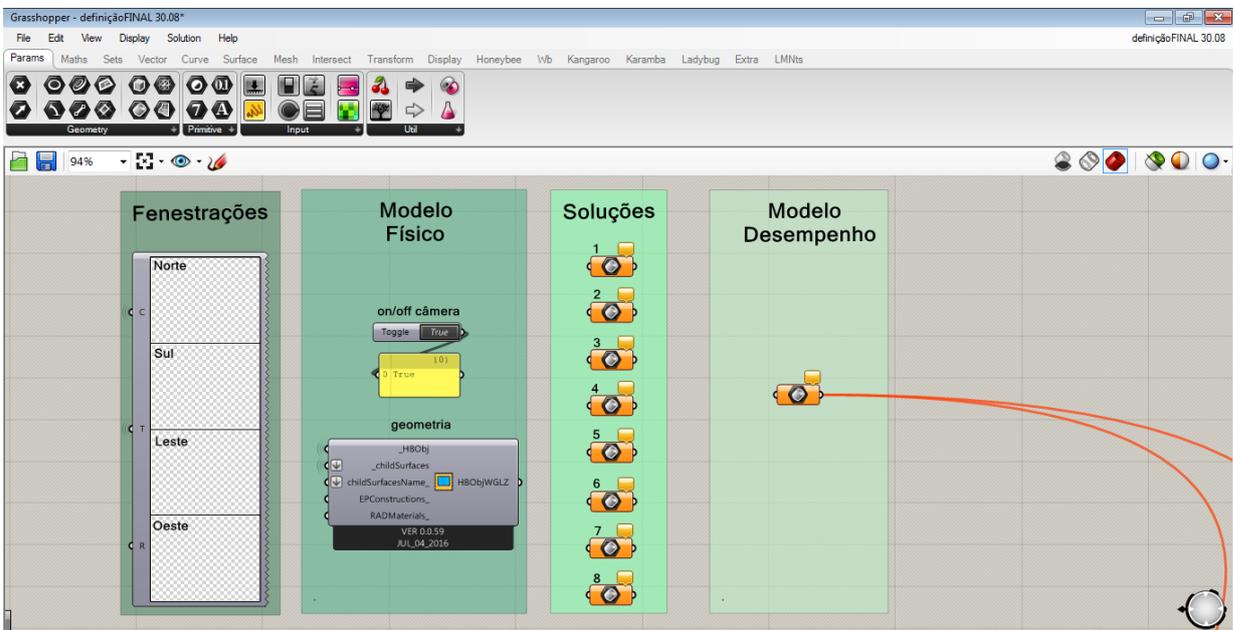
A inserção, no *Grasshopper*, do modelo geométrico foi feita em quatro etapas. Primeiro a definição do *Grasshopper* estabeleceu a leitura das geometrias capturadas no modelo físico, demarcou e situou as superfícies de piso e cobertura (que não podem receber fenestração) e determinou a orientação das fachadas e intervalos de variação das quatro orientações solares. Após instituir a estrutura e parâmetros geométricos, a definição indicou que todos os elementos geométricos constituíam uma única zona térmica. A definição da zona térmica e parâmetros de aferição, como o estabelecimento da ocupação, tipo de edificação, número de ocupantes, infiltração de ar, massa interna, materiais, cargas de equipamentos e iluminação, foram declarados através do *Honeybee*, utilizando os dados e padrões do EnergyPlus.

que o modelo de aferição adotado, contem na base de dados os demais sistemas artificiais de condicionamento do ar.

³² *Sliders* são componentes do *Grasshopper*, que permitem a alteração de valor de uma variável booleana.

A terceira etapa, foi também realizada através de componentes do *Honeybee*, determinando os tipos de análise a serem realizadas, o período de análise anual, mensal ou diário, a localização geográfica, quais os dados de saída requeridos e como devem ser representados, em gráficos ou numericamente. Por fim, agrupou-se no *Grasshopper*, a representação gráfica e numérica das fenestrações, os três componentes do modelo físico, os componentes que recebem as diferentes soluções geométricas e o ícone de acionamento do modelo de desempenho (Figura 21), todos representados e manipuláveis digitalmente no monitor número 1.

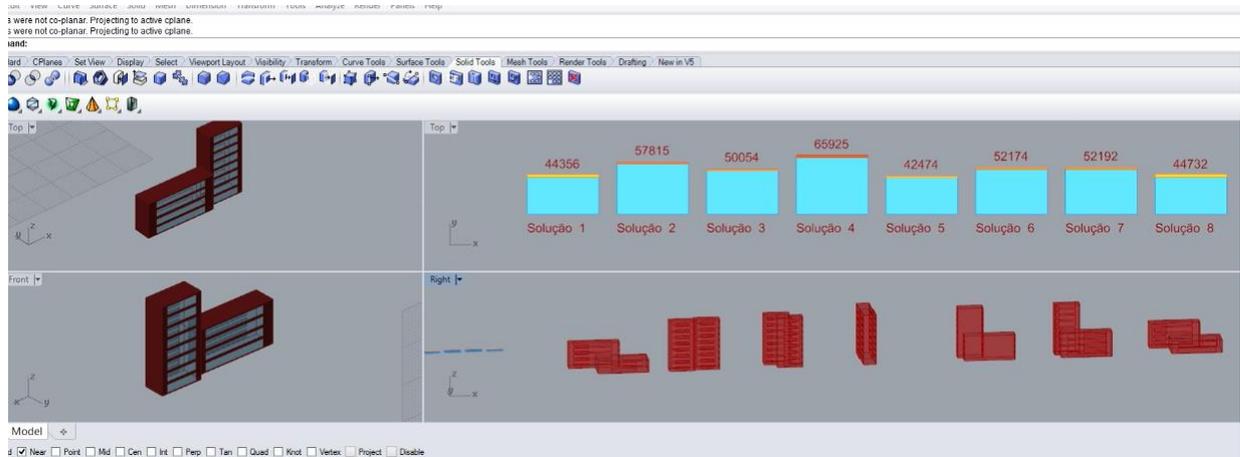
Figura 21 Representação do monitor 1



Fonte: elaborado pela autora.

O modelo de visualização dos resultados utilizou o ambiente virtual do software *Rhinceros* para representar os resultados no monitor 2, sendo apenas um modelo simplificado de reprodução das soluções geradas (Figura 22). O quadrante inferior direito ofereceu a representação gráfica da geometria, enquanto no quadrante superior direito foram representados os dados numéricos de desempenho, bem como representadas, graficamente, através de barras, a proporção de energia demandada para aquecimento em amarelo e laranja e para refrigeração em azul.

Figura 22 Representação do monitor 2



Fonte: elaborado pela autora.

O modelo de visualização dos resultados, representado nos dois quadrantes direitos do monitor 2 (Figura 22), acumulam as informações quantitativas, com exceção da representação da proporção de aberturas. A representação acumulada dos dados, juntamente com a imagem correspondente, buscou instrumentalizar o processo heurístico, sistematizando o processo de tomada de decisões e tornando o usuário mais consciente de suas decisões projetuais e a reação que as mesmas provocam. Assim, a cada simulação, o monitor 2 mantém o registro da geometria (perspectiva sudoeste) e valor com gráfico de consumo de energia – para aquecimento e refrigeração – correspondente à solução.

Os plug-ins utilizados oferecem a possibilidade de visualização, simultânea, das alterações geométricas do envoltório, através da manipulação dos parâmetros de projeto, e do desempenho energético das soluções geradas. Deste modo, a cada manipulação realizada, durante o processo heurístico de tomada de decisões, a geometria e o resultado da performance podem ser visualizados pelo monitor do modelo digital.

2.2 Experimento

O experimento teve como finalidade observar o conhecimento tácito dos graduandos e verificar como a instrumentalização associada a modelos físico e digital em EIP pode contribuir na busca por soluções de projeto.

O experimento proposto analisa os procedimentos da amostra, identificando a relação existente entre o tempo, ações de projeto e eficiência das soluções compositivas adotadas. Para avaliar as decisões projetuais utilizou-se o Método de Avaliação Empírico em Ambiente Controlado. (PRATES; BARBOSA, 2003). Visando maior controle sobre o ambiente e sobre as atividades dos usuários, adotou-se a avaliação da interface em ambiente controlado. Os participantes realizaram o teste em laboratório, sem interferência de fatores externos, como interrupções ou distrações, como frequentemente ocorre no atelier de projeto. Uma desvantagem desse método é aferir o desempenho dos usuários fora do contexto habitual do atelier acadêmico de projeto. Em compensação, a avaliação em laboratório permite maior controle sobre o que está sendo propriamente aferido, além de permitir a identificação de possíveis problemas, que em outros métodos, como protocolos verbais, tornam-se mais difíceis de identificar.

O controle sobre as condições de teste foi estabelecido a partir de um protocolo, certificando-se de que as condições de teste e materiais seriam as mesmas para todos os participantes. A aplicação foi realizada individualmente com acompanhamento da autora e sem interferências. Os participantes receberam as instruções da atividade, motivados a considerar a minimização do consumo energético anual, e considerando os demais atributos que já são tratados habitualmente durante a exploração da forma nas etapas iniciais de seus projetos, como: a permeabilidade visual, proporção dos volumes, funcionalidade, conforto dos ambientes internos, estratégias passivas, entre outras.

O experimento procurou observar se os participantes conseguiriam utilizar o PASA, avaliando o quanto guiado³³ foi o processo de projeto. Os procedimentos adotados visaram identificar e quantificar a relação entre:

- (a) Quantidade de soluções e seu desempenho
- (b) Tempo e desempenho das soluções
- (c) Ações de projeto e tempo de execução
- (d) Questionário e desempenho das soluções

O impacto que a avaliação do desempenho pode causar no processo de aprendizagem, também foi analisado, observando-se o grau de aprendizagem, decorrente de uma linha de tendência traçada para a relação entre tempo e consumo de energia, resultantes da sequência esboçada pelas soluções de projeto.

Os procedimentos foram gravados, os dados protocolados e analisados. A análise do processo de projeto foi baseada na identificação do comportamento do conhecimento tácito presente na atividade de manipulação da geometria do envoltório nas fases iniciais de projeto. O registro de dados e observações fez uso do modelo proposto por Cooke (1999) em que os dados têm registro quantitativo e a avaliação do processo de elicitação do conhecimento ocorre através de análise qualitativa.

2.2.1 Método quantitativo

O método quantitativo de análise consiste na coleta sequencial dos dados do experimento. Os dados são quantificados e rastreados segundo o método ESDA – *Exploratory Sequential Data Analysis*. (COOKE, 1999). Esse método consiste no registro sequencial das ações desenvolvidas durante o experimento, frequentemente utilizado no domínio IHC. (SANDERSON; FISHER, 1994).

O experimento forneceu dois blocos no qual buscou-se explorar a relação espacial entre os volumes prismáticos e a proporção de suas aberturas, através da

³³ O termo guiado, utilizado neste trabalho, trata de observar o quanto o processo de projeto foi orientado, pautado e conduzido pelo protótipo de ambiente simplificado de aprendizagem.

manipulação física dos elementos do envoltório. A atividade foi gravada em vídeo via software de captura dos movimentos exercidos pelos usuários e filmagem geral do ambiente de projeto e usuários, através de câmera de celular. Após a captura das imagens, os vídeos foram assistidos para registrar as ações realizadas, correlacionando as variáveis: tempo, transformações geométricas – rotação, translação e escala – forma e desempenho das soluções alcançadas pela amostra.

A partir da mensuração das variáveis, analisou-se o tempo de realização da tarefa em relação à performance das soluções de projeto. Em outras palavras, buscou-se verificar se a antecipação da avaliação do consumo energético através da manipulação de modelos físicos associados a modelos digitais pode aumentar a eficiência do processo de projeto em etapas iniciais, identificando a curva de aprendizagem de cada participante³⁴.

Baseado na curva de aprendizagem, o estudo avaliou o desempenho de um grupo de usuários segundo uma tendência do tipo linear, através da observação das variáveis: tempo de trabalho demandado por solução de projeto, número de soluções em intervalo fixo de tempo e redução do consumo de energia para aquecer e refrigerar o ambiente interno edificado pela quantidade de ações de projeto executadas. Através da análise das ações de projeto em relação ao tempo e resultados de desempenho das soluções, delineou-se o quanto orientado foi o processo de projeto, estabelecendo uma curva de tendência, conforme os resultados apresentados a seguir, no capítulo 3.

³⁴ A curva de aprendizagem pode ser utilizada como ferramenta para monitoramento do desempenho de um grupo de indivíduos submetidos a uma nova tarefa manual repetitiva, avaliando seu progresso na medida em que repetições são efetuadas. (ANZANELLO; FOGLIATTO, 2007). Segundo Wright (1936) à medida que o usuário realiza repetições, reduz-se o tempo demandado para a execução de uma tarefa, seja pela familiaridade adquirida com os meios e ferramentas de produção ou pela descoberta de “atalhos” para a realização da tarefa. Ao avaliar o custo de montagem de aviões, durante a Primeira Guerra Mundial, Wright (1936) formulou uma curva de aprendizagem, denominada “curva de 80%”. A regra proposta por Wright determinava a redução de 20% no custo acumulado médio, a cada duplicação da montagem de uma determinada quantidade de aeronaves. A aferição do desempenho de um usuário na execução de uma tarefa pode ser aferida através da observação das variáveis: tempo de trabalho demandado por unidade produzida, número de unidades em intervalo fixo de tempo, redução dos custos por unidade e porcentagem de unidades não-conformes pelo número de repetições de uma mesma operação. (TEPLITZ, 1991).

2.2.2 Método qualitativo

O método qualitativo visou analisar os procedimentos e ações que impactam o tempo da tarefa proposta pelo experimento, durante o uso das ferramentas que compõem a metodologia, identificando padrões de comportamento que, dificilmente, são detectados somente pela análise quantitativa. A avaliação qualitativa utilizou as gravações em vídeo para observar os momentos em que os alunos apresentam maior dificuldade, as situações em que as interfaces auxiliam de maneira mais eficaz a tomada de decisões frente ao desempenho energético e as situações em que os modelos de desempenho podem dificultar o processo criativo.

A avaliação qualitativa consiste na observação dos elementos que a amostra apresentou maior dificuldade ou facilidade, inconsistências que a interface utilizada apresentou com maior frequência e os pontos em que através do teste piloto, observou-se necessidade de alterar a metodologia e o protocolo adotado.

2.3 Preparação do Experimento

O experimento associou métodos quantitativo e qualitativo com o objetivo de verificar as variáveis, procedimentos e comportamentos que influenciam no uso da metodologia proposta. Dado que a metodologia associa um conjunto de ferramentas computacionais a um modelo físico de manipulação, a avaliação do uso desse ambiente de projeto permite identificar problemas de interação e interface, verificar o entendimento do usuário sobre a tarefa fornecida e traçar diretrizes como um padrão ou conjunto de melhorias possíveis de serem adotadas para a metodologia. O uso permite avaliar um sistema ou ambiente com relação a fatores como a facilidade de aprendizagem, facilidade de uso, eficiência de uso e produtividade, satisfação do usuário, flexibilidade, utilidade e segurança durante a utilização.

Foi utilizado um conjunto de critérios para a preparação do teste:

- (1) Determinação do objetivo da avaliação
- (2) Seleção de tarefa

- (3) Limitação da amostra e seleção dos participantes
- (4) Definição do material
- (5) Determinação do protocolo de avaliação
- (6) Realização de Teste Piloto
- (7) Coleta de dados

2.3.1 Objetivo da avaliação

O objetivo da avaliação foi analisar se os alunos conseguem utilizar e compreender o PASA, qualificando o processo de tomada de decisões, sistematizando e verbalizando o conhecimento implícito e tácito, frequente em etapas iniciais. Em função do objetivo, definiu-se avaliar a facilidade e eficiência de uso do ambiente. Os pontos críticos avaliados foram identificados segundo as questões:

- O usuário consegue utilizar o PASA, executando as tarefas manipulação e simulação da forma?
- O protótipo oferece a sistematização e verbalização do processo de projeto ao buscar soluções que minimizem o consumo de energia?
- O protótipo promove o aprendizado dos impactos que a forma exerce sobre o consumo de energia, aumentando a confiabilidade das decisões de projeto?
- O PASA oferecido auxilia no processo de aprendizagem e tomada de decisões?

2.3.2 Tarefa

A tarefa definida para a avaliação considerou um problema típico das EIP visando criar um exercício projetual característico desta etapa inicial de projeto. Além de propor um tema característico, a tarefa considera o tempo de execução que os usuários vão necessitar para compreender o ambiente e explorar soluções de projeto.

O tempo de execução ideal indicado em testes de usabilidade é 20 minutos, mantendo o tempo total do experimento inferior a uma hora, para não ser uma atividade cansativa, podendo desmotivar o participante. (PRATES; BARBOSA, 2003). O tempo limite fornecido para o usuário foi avaliado no teste piloto, em que o participante teve 20 minutos para executar a tarefa. Através do teste piloto, constatou-se que adicionando dez minutos ou mais ao tempo de execução, os resultados obtidos poderiam ser representativamente satisfatórios para a avaliação do uso, sem prejudicar a execução do exercício. Tal verificação conformou um ajuste no tempo total o qual foi executado o experimento.

O uso adotado para estudo foi uma tipologia comercial, localizada em Porto Alegre/RS³⁵. O usuário recebeu apenas 30 minutos para explorar o problema de projeto sendo o entorno, edificações vizinhas, vegetação e outros equipamentos urbanos extraídos do ambiente de estudo, simplificando as variáveis envolvidas na resolução da tarefa. O material do envoltório foi fornecido previamente aos usuários, não sendo permitido alterá-lo durante o experimento.

O desafio do usuário foi utilizar o PASA para reduzir o consumo de energia médio anual de uma edificação comercial utilizado para aquecer e refrigerar o ambiente interno. Uma vez definido o escopo da tarefa, tipo e tamanho da amostra fez-se a seleção dos usuários, para a execução do exercício projetual.

2.3.3 Amostra

A amostra incluiu 21 alunos³⁶ de graduação do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, do sexto até o último semestre do curso, que possuíssem conhecimento básico de projeto arquitetônico, já tendo cursado a disciplina de habitabilidade, e conseqüentemente, tendo noções elementares sobre conforto e desempenho. Homens e mulheres de qualquer faixa

³⁵ Tendo em vista que os estudantes selecionados para a amostra utilizam com maior frequência objetos nesta localização geográfica e clima em disciplinas em atelier já estando familiarizados com as variáveis ambientais que o tipo de problema apresentado envolve.

³⁶ Avaliações empíricas em testes de usabilidade variam quanto ao número de usuários, podendo envolver de cinco a quinze participantes. (PRATES; BARBOSA, 2003).

etária puderam participar desde que estivessem matriculados regularmente na universidade. Os graduandos em arquitetura foram estimulados a utilizar o PASA para instrumentalizar o processo de projeto; tornando o conhecimento implícito, predominantemente presente em etapas iniciais, em conhecimento explícito e sistemático, de modo a torná-lo mais consciente de suas ações projetuais.

2.3.4 Material

O objeto utilizado para o estudo foi o *Gift 4* (Figura 23), um dos brinquedos do método *Kindergarten*³⁷, concebido por Fröebel³⁸, para estimular a criatividade e atividades motoras e sensoriais na infância. Dado que o objeto de investigação relacionava-se a EIP foram selecionados volumes prismáticos elementares, admitindo múltiplos posicionamentos.

Figura 23 *Gift 4*



Fonte: Fröebel... (2016)

³⁷ O método *Kindergarten* baseia-se em categorias de formas geométricas, contidas em uma série de *gifts* geométricos, os quais as crianças descobrem suas propriedades e possibilidades de desenho (STINY, 1980). Além de ser um método reconhecido por educadores e pedagogos é conhecido também por arquitetos e designers, pela consideração expressa por Frank Lloyd Wright, que ganhou de sua mãe os *gifts*, reconhecendo que o método *Kindergarten* de Fröebel é parte de sua formação.

³⁸ Friedrich Wilhelm August Fröbel, pedagogo alemão, foi destaque no cenário educacional no século XIX pelos princípios educacionais, valorizados pela continuidade do desenvolvimento, atividades motoras e sensoriais durante a infância, sendo o primeiro educador a utilizar o brinquedo como parte do método de ensino. O método proposto em 1837 por Fröebel consiste em um modelo que as crianças expressavam-se através de atividades de percepção sensorial, da linguagem e do brinquedo.

O conjunto de Fröebel é composto por oito prismas de madeira iguais, definidos por proporções de 1 para 2 para 4. Para o experimento utilizaram-se dois prismas do *Gift 4*, dada a similaridade com tipologias comerciais identificadas pela composição de um ou dois volumes prismáticos, caracterizando tipologias horizontais, verticais, ou combinadas conforme exemplos localizados na cidade de Porto Alegre (Figura 24). Mesmo considerando que edificações comerciais são, predominantemente, compostas por um único volume localizado no centro do lote, optou-se por adicionar mais um elemento prismático para ampliar o número de possibilidades compositivas, aumentando a complexidade do exercício. Os dois volumes prismáticos resultam 1.152 m² de área útil total, independentemente da posição que estiverem sobre a base.

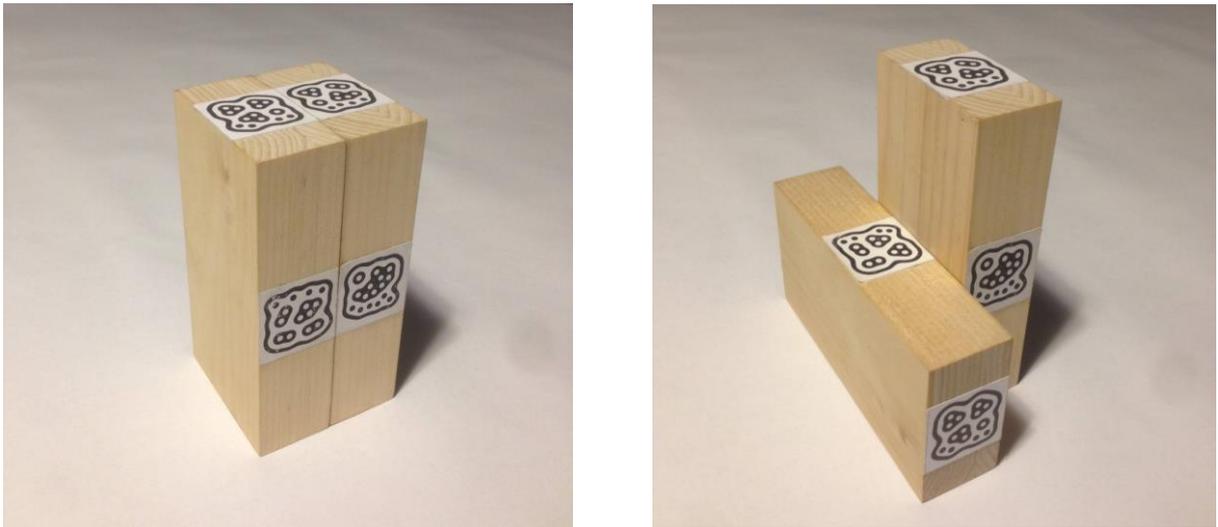
Figura 24 Exemplo de tipologias comerciais encontradas em Porto Alegre/RS



Fonte: Disponível em: (1) <http://www.buenoimoveis.com/> (2) <http://www.imobiliariagrenal.com.br/> (3) e (4) <http://www.lopes.com.br/>

As duas peças propostas utilizadas no experimento foram produzidas em MDF (Figura 25) sem representação de aberturas ou demarcação específica de pavimentos. A definição da proporção, escala e contextualização das peças, ocorreu referenciada pela base física, sobre a qual as peças de MDF são manipuladas. A base de delimitação dos objetos físicos possui a representação do norte geográfico, descrição da escala proposta (1/200) e grid de representação como descrito anteriormente na descrição do modelo físico.

Figura 25 Peças propostas para o exercício projetual



Fonte: fotografia da autora.

A escolha da volumetria para o exercício projetual (Figura 25) seguiu dois critérios. Primeiro, considerou-se a complexidade de resolução de forma para que o tempo de execução não fosse excessivo. Em segundo lugar, foram escolhidas peças iguais para que soluções elementares e soluções geométricas com variações de altura e relações espaciais distintas pudessem ser exploradas³⁹. Definidos os objetivos, tarefa e perfil dos participantes estabeleceu-se um protocolo de avaliação.

2.3.5 Protocolo de avaliação

O protocolo foi desenhado para avaliar rotinas, ideias e valores modelados mentalmente pelo indivíduo ao projetar o envoltório. O protocolo de avaliação inclui o Termo de Consentimento Livre Esclarecido (TCLE - Apêndice D), os questionários aplicados no início e final do teste, explicitação do processo de teste aos usuários e roteiro com descrições e sequência do exercício projetual fornecido como tarefa para

³⁹ Embora o material selecionado para o experimento tenha se restringido aos dois elementos prismáticos iguais, a metodologia proposta pode se adaptar a outras formas geométricas elementares, como triângulos, cubos ou prismas de diferentes dimensões. Ao experimentar outros tipos de peças, sendo uma peça diferente da outra no mesmo modelo, observou-se certa dificuldade na leitura das intersecções no modelo geométrico digital e consequentemente no modelo de desempenho. Mas, desdobramentos futuros poderiam explorar a complexidade de outras geometrias, ampliando a utilização de ambientes simplificados de aprendizagem, como o PASA.

os participantes. O experimento foi realizado nos dias 15/05/2017, 16/05/2017, 17/05/2017, 18/05/2017 e 19/05/2017.

O estudo restringiu o vocabulário de formas e relações espaciais, para aproximar os resultados da amostra. Ao manipular as possibilidades geométricas do envoltório, os usuários puderam variar sua geometria – através de transformações euclidianas: rotação e translação – e proporção de fenestrações – variando a escala dos planos translúcidos de fachada. A translação no eixo xy e a rotação nos eixos xyz conduziram a manipulação dos dois prismas, enquanto fenestrações foram determinadas pela escala dos planos translúcidos das fachadas norte, sul, leste e oeste. A restrição para as transformações dos elementos prismáticos foi determinada pela necessidade de comunicação entre volumes, ou seja, os prismas deveriam estar encostados em alguma das faces possibilitando que houvesse, no mínimo, uma circulação entre zonas. Além disso, volumes não poderiam ser sobrepostos ou empilhados devido à dificuldade em estabelecer a comunicação entre a câmera e marcadores. Para adicionar o empilhamento como variável de manipulação, futuros trabalhos poderão explorar e testar a associação de novas interfaces computacionais, como sensores de movimento, sensores de presença, projetores, entre outros.

As variáveis e restrições estabelecidas para o exercício projetual constituíram cenário com delimitações claras, composto por características típicas de um partido arquitetônico. O experimento teve sequência de nove etapas. A sequência foi transmitida para todos os participantes, conforme descrito a seguir.

1° - Apresentação verbal do estudo. Exposição do tema da tese, visando informar aos *participantes* os objetivos da pesquisa, conforme descrito abaixo.

“O exercício projetual proposto neste experimento, faz parte de pesquisa que tem como tema o uso de objetos físicos associados a modelos de desempenho como elemento qualificador do processo de projeto. O experimento visa avaliar o processo projeto envolvido na tomada de decisões voltadas para minimizar o consumo de energia de edificações comerciais.”

2° - Aplicação do questionário inicial. Para verificar o perfil e conhecimento da amostra, conforme Apêndice A.

3° - Exposição do objetivo do exercício. Apresentação do objetivo específico proposto, conforme descrição:

“O objetivo do exercício é analisar os impactos que o ambiente de projeto, proposto neste trabalho, exerce durante o processo de projeto visando minimizar o consumo de energia utilizado para aquecimento e refrigeração de uma edificação comercial em práticas arquitetônicas de comum domínio.”

4° - Apresentação da metodologia – PASA. Esclarece como funciona o ambiente de projeto e no que está fundamentado.

“O ambiente de projeto proposto consiste na associação de um modelo físico e um modelo digital, buscando antecipar a simulação do desempenho às EIP. O modelo digital consiste em uma interface gráfica de visualização das fenestrações e resultados gráficos e numéricos da simulação energética do envoltório, enquanto o modelo físico visa à manipulação da geometria do envoltório e fenestrações, disponibilizando a visualização da forma e das relações geométricas estabelecidas entre volumes. O ambiente utiliza uma câmera e marcadores (fiducial markers) para que as alterações geométricas (rotação, translação e escala) realizadas no modelo físico, possam ser capturadas pelo modelo digital. Enquanto, a proporção das fenestrações pode ser alterada através de potenciômetros e visualizável no modelo digital, em perspectiva e numericamente.”

5° - Exposição do exercício projetual proposto. Descreve o exercício de projeto, inserindo o participante em cenário de atelier de projeto. Essa descrição objetivou que os alunos correlacionassem informações de desempenho fornecidas com fatores frequentemente considerados durante o partido arquitetônico, tais como a orientação solar, funcionalidade dos espaços, relações entre ambiente interno e externo, entre outros. A apresentação do exercício esclareceu as restrições e parâmetros que deveriam ser adotados na exploração do problema de projeto proposto e utilizou um *passo a passo* para auxiliar no processo de avaliação do desempenho:

“Considerando dois prismas regulares como elementos volumétricos desse exercício projetual, proponha uma solução compositiva entre estes volumes e a proporção de suas aberturas, buscando a minimização do consumo de energia elétrica (para aquecer e resfriar o ambiente). Ponderando que as aberturas podem ser

determinadas na proporção 0%, 25%, 50% ou 75% em relação à área de cada uma das fachadas e considerando que a forma apresentada inicialmente possui um consumo médio anual de **50,4 MWh** (para aquecer e resfriar o ambiente), busque reduzir o gasto energético para as condições abaixo descritas:

- a) Lote urbano de 20 metros de frente e 35 metros de profundidade, sem edificações em sua proximidade e localizado na cidade de Porto Alegre, segundo orientação solar representada na base do modelo;
- b) Cada prisma possui faces iguais: 6 x 12 x 24 metros, sendo que, somente as faces 6x12m e 6x24m podem estar em contato com a base, permitindo edificações de 4 ou 8 pavimentos.
- c) A escala do modelo físico é 1/200 e as dimensões reais da malha (representada na base do modelo físico) é 3x3 metros.
- d) Os prismas podem ser movimentados no plano x/y/z, ou seja, é possível rotacionar ou transladar os dois volumes em qualquer sentido evitando, entretanto, que sejam empilhados.
- e) Os prismas devem se tocar em alguma das faces, mantendo adjacência mínima de um módulo (3 metros).
- f) Deve-se manter a ortogonalidade dos volumes em relação ao eixo xy da base.
- g) Dado que as aberturas podem ser determinadas na proporção 0%, 25%, 50% ou 75% em relação à área de cada uma das fachadas, no mínimo uma das fachadas devem obter 75% de abertura, para preservar a permeabilidade visual entre o ambiente interno e o ambiente externo.
- h) Os materiais considerados para a edificação restringem-se às aberturas de alumínio com vidro duplo 3mm, paredes duplas de tijolo e laje de concreto com telha acústica 20mm na cobertura.
- i) O modelo de desempenho adotado considera um sistema de ar condicionado central, mantendo a temperatura interna no intervalo de 20°C a 24°C. Como a área, volume e funcionalidade do modelo geométrico são constantes, o consumo de energia elétrica equipamentos e aparelhos elétricos não são referidos.

O modelo digital é representado através de dois monitores. O primeiro monitor (à sua esquerda) permite a visualização e articulação dos dados e procedimentos

para avaliação da performance. O monitor número 2 representa graficamente os resultados energéticos avaliados, com as respectivas geometrias, assim como representa duas perspectivas (nordeste e sudoeste) da geometria que está sendo avaliada no modelo físico corrente. A performance é solicitada através de quatro etapas procedimentais realizadas no monitor n°1, através do aplicativo Grasshopper. Sendo assim, depois de manipular a forma do envoltório e as fenestrações, pode-se realizar uma avaliação. Para realizar a simulação da performance de uma solução, conforme descrito na seção 0, primeiramente deve-se salvar a geometria escolhida, selecionar da opção 'internalize data', desativar a câmera e, por fim, conectar o componente 'solução' ao modelo de desempenho.

Para manter um fluxo de dados e representação gráfica rápida e ágil, o modelo de desempenho adotado é simplificado, sendo modelado através de uma zona térmica única. Desconsideraram-se as compartimentações internas do edifício, assim como a delimitação de espaços de circulação e zonas de menor ocupação. Deste modo, os dados de entrada para a simulação seguem o mesmo padrão de zona para toda a metragem quadrada da edificação em análise. A avaliação simplificada adota como dados de entrada a geometria determinada no modelo físico e parâmetros recomendados pela ASHRAE Handbook (2013) e outros parâmetros default dos softwares e aplicativos, baseando-se na tipologia comercial.”

6° - Execução de simulação como exemplo. Para que a amostra tivesse ponto de partida e informações semelhantes, foi analisado um exemplo com a mesma solução geométrica e proporção de aberturas, usando o passo a passo explicado anteriormente e executando a simulação. A geometria adotada seguiu a configuração da Figura 26, tendo 50% de fenestrações nas fachadas norte e oeste, e 75% nas fachadas sul e leste.

Figura 26 Perspectivas sudoeste e nordeste da volumetria adotada como forma inicial do exercício projetual proposto



Fonte: elaborado pela autora, através dos softwares: Rhinoceros e Grasshopper.

7º - Fornecimento do material e tempo. O usuário recebeu as informações do material disponível e tempo para explorar soluções de projeto. Disponibilizou-se 30 minutos para realizar a manipulação dos prismas regulares, em busca da solução de envoltório que o usuário definisse como mais eficiente, sob ponto de vista energético (menor consumo de energia para aquecimento e refrigeração). Nesta etapa, descreveu-se o material e o protocolo de declaração do processo de projeto, conforme informado verbalmente para os alunos:

“Para realizar a tarefa você poderá empregar o ambiente de projeto, composto pela maquete e ambiente digital de simulação, além de poder utilizar lápis, papel e um gabarito (Apêndice B), para auxiliar no registro das soluções de projeto.” Você poderá manipular a volumetria e as fenestrações durante 30 minutos, podendo simular uma estratégia, sempre que desejado.

Sempre que solicitada uma simulação, você deverá registrar no gabarito a estratégia adotada. O registro deve apresentar um esboço/croqui da volumetria, conforme a orientação solar, e deve-se assinalar ou pintar a proporção das aberturas, conforme o gabarito pré-determina. Esse registro deve ser realizado para todas as soluções avaliadas pelo modelo digital de desempenho. Além disso, caso julgar apropriado registrar outras estratégias, pensamentos ou soluções, poderá utilizar as folhas em branco fornecidas, podendo esboçar, desenhar e escrever sempre que desejado.

Faltando cinco e dois minutos para acabar o tempo você será avisado, e quando o tempo esgotar você deverá apresentar a solução compositiva (com a proporção de aberturas) que julgar mais adequada, tendo em vista a minimização do consumo de energia.

*Agora você tem trinta minutos para manipular as **fenestrações** e a **forma**, realizar simulações quando julgar apropriado, e apresentar a solução que julgar mais adequada para a minimização do consumo para o condicionamento do ambiente interno.”*

8° - Seleção e questionamento sobre solução adotada. O participante foi instado a declarar a solução com maior eficiência entre as soluções aferidas. Posteriormente, foi pedido que apontasse a solução mais adequada para prosseguir com o partido arquitetônico.

“Circule a soluções, esboçada no gabarito, energeticamente mais eficiente. Agora, assinale com um X a solução, esboçada no gabarito, que você julga mais eficiente para prosseguir com o partido arquitetônico, considerando outras questões além do desempenho. Justifique no verso do gabarito, por que adotaria essa solução para prosseguir com o processo de projeto. Você considerou outras questões além da minimização? as decisões geométricas tomadas, o dimensionamento das aberturas e outras características dessa solução, devem-se a que outras estratégias arquitetônicas e/ou fatores de desempenho?”

9° - Aplicação de questionário final. Depois de realizado o exercício projetual e justificar a escolha adotada, o participante é questionado sobre o processo que o fez chegar às soluções propostas; através de um questionário, conforme Apêndice C. Os dois questionários, aplicados respectivamente no início e término do experimento, visam o balizamento da amostra e avaliação do uso do PASA.

2.3.6 Questionário

O questionário inicial de balizamento indicou as características da amostra analisada e identificou a utilização e frequência que modelos físicos e modelos computacionais são utilizados em EIP. A identificação do perfil dos participantes do experimento visou ponderar possíveis distinções de níveis de conhecimento da amostra em etapas iniciais. Além disso, buscou-se identificar se a idade e tempo de curso de graduação teriam influência nas ações cognitivas dos usuários.

O questionário foi composto pelos itens:

- 1- Idade;
- 2- Semestre do curso de graduação;
- 3- Frequência e uso de modelos físicos;
- 4- Uso e identificação de softwares;
- 5- Uso de softwares para avaliação do desempenho;

O modelo utilizado para o questionário do início do exercício encontra-se no Apêndice A. O quadro com médias e porcentagens resultantes do questionário inicial encontra-se na Tabela 20, no capítulo seguinte, seção 3.2.1.

Após a conclusão de todo o exercício projetual, solicitou-se aos participantes para responder o questionário final, composto pelos itens:

- 1- Uso e eficácia do PASA;
- 2- Uso em projetos futuros;
- 3- Sugestões de melhoria;
- 4- Identificação de ferramentas similares;

O questionário de encerramento da atividade visou com que os participantes relatassem a experiência realizada durante o exercício, declarando se julgou eficiente o ambiente de projeto proposto (PASA), associando modelo físico e digital. Além disso, o participante justificou porque utilizaria ou não o ambiente proposto, assim como descreveu possíveis alterações ou considerações para melhorias. O questionário final (Apêndice C) objetivou compreender como o usuário visualizou a

ferramenta e se identificou alguma similaridade com outro ambiente de projeto, método ou ferramenta computacional de auxílio às EIP.

Juntamente com o questionário inicial, entregou-se aos participantes, um Termo de Consentimento Livre Esclarecido, conforme modelo disponibilizado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da UFRGS. O Termo de Consentimento, disponibilizado no Apêndice D, esclarece o tema e objetivos da pesquisa, elucida as atividades desenvolvidas pelos participantes, assegurando o sigilo e privacidade dos mesmos e de todos os dados e elementos gerados que pudessem identificá-los.

Os procedimentos e sequência estabelecidos pelo protocolo e a definição dos questionários propostos para o experimento foram ajustados conforme as diretrizes estabelecidas após a realização de análise prévia e teste piloto.

2.3.7 Teste Piloto

As primeiras avaliações do PASA foram realizadas ao longo do desenvolvimento da interface, através da manipulação recorrente da ferramenta. Graduandos do programa de iniciação científica do Simmlab/ UFRGS, em exercícios exploratórios sem protocolo ou método específico de análise contribuíram para os avanços da pesquisa. Após um ciclo de variações, testes e experimentações, definiu-se um esboço e estabeleceram-se diretrizes para a aplicação de um teste piloto.

O teste piloto foi realizado com dois graduandos em laboratório. Forneceram-se 20 minutos para que os participantes executassem simulações e manipulações geométricas, em busca de soluções energeticamente eficientes. O exercício proposto pelo teste piloto, variáveis e restrições foram as mesmas do experimento final, com exceção do gabarito, uma das adequações que o teste piloto proporcionou para aplicação final.

Ao final do teste piloto, a pesquisadora realizou coleta de opiniões e observações em conversa informal⁴⁰. O relato dos usuários e constatações da pesquisadora, durante o teste, influenciaram alterações, tais como a modificação de alguns termos e perguntas dos questionários, ampliação do tempo total de execução da tarefa, adição do gabarito para auxiliar a representação das ideias e processos mentais do aluno e modificação da sequência de algumas explicações atribuídas no protocolo. Constatou-se que os vinte minutos fornecidos eram demasiadamente reduzidos para a associação das novas ferramentas e execução da tarefa, tendo em vista que os dois usuários-teste relataram que seria pouco tempo para a execução a tarefa e propuseram aumentar de dez a vinte minutos o tempo de exploração do ambiente, já que toda a interface e softwares utilizados eram inéditos para ambos. A linguagem do questionário teve tópicos alterados visando oferecer termos mais objetivos e próximos da linguagem utilizada pelo público alvo, visando ajustar as dificuldades observadas na aplicação do teste piloto.

O relato do segundo participante do teste piloto, declarando a dificuldade que teve em manter conexão entre a velocidade de seus processos mentais em relação as ações executadas no modelo proposto, resultaram na adição de mais uma característica para o modelo de análise proposto. Ao avaliar o relato, a pesquisadora procurou mitigar essa dificuldade. Após algumas variações, estabeleceu-se o gabarito de protocolo das ações de projeto. O protocolo foi estabelecido através de ações manuais, croquis e hachuras, devido às restrições de tempo de execução da presente pesquisa. Esta questão é tratada em detalhe nas diretrizes para trabalhos futuros, demonstrando o potencial que a adição de outros modelos computacionais e ferramentas de representação podem exercer no processo de tomada de decisões. O aprimoramento do ambiente pode associar outras ferramentas de representação, de modo, que o gabarito de ações, realizado com lápis e papel, possa ser incorporado ao modelo digital.

⁴⁰ A conversa informal foi realizada através de diálogo entre graduandos e pesquisadora, questionando os elementos que poderiam ser aprimorados, os graduandos relataram os pontos do teste que acharam de difícil entendimento e questionaram algumas características do teste e da ferramenta utilizada.

2.3.8 Coleta de Dados

Depois de realizar os ajustes recorrentes do teste piloto, iniciou-se a execução do experimento, através da aplicação do exercício descrito pelo protocolo de avaliação na seção 0.

O exercício realizado foi gravado com *software* gratuito de captura de tela *Screenshot Captor* e, simultaneamente, por uma câmera de celular padrão. A captura da tela visou o registro das soluções e seu respectivo desempenho, enquanto a filmagem objetivou registrar os movimentos realizados no modelo físico. Foram gravados 42 vídeos, sendo vinte e uma capturas de tela e vinte e uma filmagens, totalizando mais de 21 horas de gravação, tendo em vista a participação de 21 alunos de graduação.

O tempo gravado ultrapassou os 30 minutos para alguns participantes, devido à demora do computador em desempenhar uma função requerida. Sempre que o computador demorava mais do que 5 segundos para responder a um comando, o cronômetro era pausado e retomava-se a cronometrar o tempo após o computador responder, mas a gravação continuava em processamento. A quantidade de soluções aferidas, durante os trinta minutos de exercício, variou entre os participantes, totalizando 202 soluções simuladas durante todo o experimento. A cronometragem do tempo total manteve-se igual para todos os participantes. Alguns participantes exploraram sete soluções, enquanto outros chegaram a simular quatorze soluções para o mesmo problema.

A partir dos vídeos coletados, realizou-se o registro das ações, definindo a sequência de alterações de geometria e alterações nas fenestrações, delimitando a recorrência e sequência de ações em relação ao desempenho energético. O tempo também foi registrado, correlacionando o intervalo entre simulações e o consumo de energia obtido por cada solução e/ou estratégia adotada. Para isso foi criado um conjunto de gráficos, evidenciando o processo de projeto e delineando uma curva de tendência para cada indivíduo da amostra. Gerou-se uma tabela, através do *software* Microsoft Excel 2010 (Tabela 1), unindo os dados de simulação do desempenho, tempo e parâmetros geométricos (proporção das fenestrações nas quatro diferentes fachadas e relação entre a volumetria) para cada participante.

Tabela 1 Modelo de tabulação dos dados do exercício

Participante C 22anos 8º semestre											
Maquetes em etapas iniciais: pouco			Softwares em etapas iniciais: SketchUp e Rhinoceros/Grasshopper				Desempenho em etapas iniciais: não				
SOLUÇÕES											
PARÂMETROS	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º
Tempo (min.)	0	2,00	5,50	8,50	11,00	14,00	17,00	19,50	22,00	25,00	30,00
F Norte	50%	50%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	0%	25%	0%
F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	50%	25%	75%
F Leste	75%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	75%	75%	50%
F Oeste	50%	25%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	75%	50%	50%
Geometria (pers sudoeste)											
Desempenho (MWh)	50,4	36,9	41,2	43,2	44,6	47,0	36,9	42,7	45,2	40,2	36,5

Fonte: elaborado pela autora.

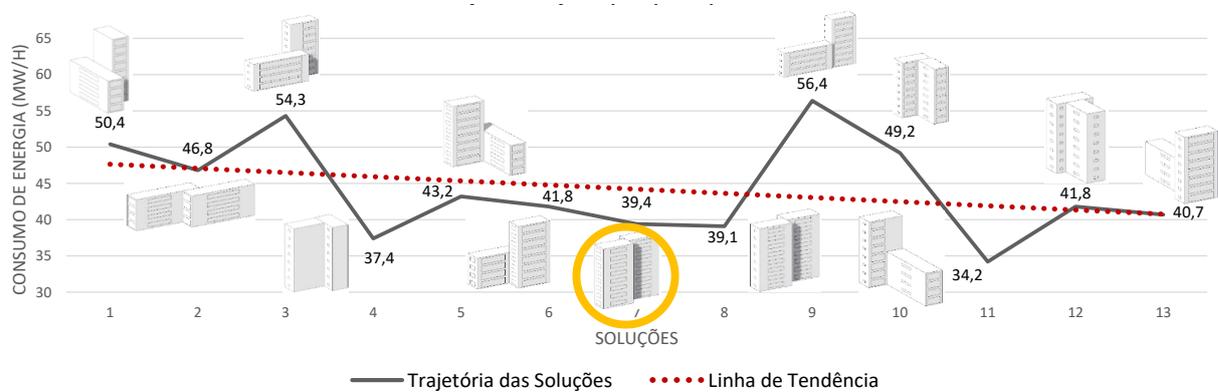
A tabela objetivou mapear a recorrência e sequência de ações, preparando os dados para a geração de Mapas de Procedimento. Na barra superior da tabela, consta a descrição das informações coletadas no questionário inicial, identificando se a idade ou tempo de curso de graduação (semestre) influenciou nos resultados. As duas linhas subsequentes expõem o número e sequência das soluções aferidas pelo participante, assim como, descreve o período exato entre simulações.

A identificação na cor amarela representada no parâmetro fenestração identifica sempre que uma alteração numérica foi realizada, destacando a adoção de uma nova estratégia em relação à solução anterior. A barra pintada na cor cinza representa a recorrência da proporção da fenestração em relação à solução prévia. Após as linhas correspondentes aos dados das fenestrações, a tabela representa uma imagem da perspectiva sudoeste da solução adotada como estratégia volumétrica para a simulação. A variação gradual das cores, abaixo da imagem das soluções geométricas, destaca a recorrência e alterações da geometria. Na última linha da tabela, encontram-se o consumo de energia referente ao aquecimento e refrigeração das respectivas soluções. A célula de desempenho, realçada em amarelo, refere-se à solução adotada pelo participante como mais adequada para o partido arquitetônico, enquanto a numeração grifada em negrito corresponde à solução que consumiu menos energia com ar condicionado, em MWh.

O primeiro gráfico (Figura 27) gerado através da tabela modelo, correlaciona o consumo de energia em MWh e as soluções adotadas pelo participante, mapeando a sequência de ações em linha e permitindo o traçado de uma linha de

tendência. A linha de tendência linear demonstra se as ações de projeto, que variam em movimento crescente e decrescente (altos e baixos) convergem para a redução do consumo das soluções ou aumento. A linha de tendência serve para colocar em evidência os impactos que o uso da metodologia e associação dos ambientes de projeto ao antecipar a avaliação do desempenho pode ter nas EIP, quando a forma ainda está sendo explorada intuitivamente.

Figura 27 Exemplo de gráfico correlacionando consumo de energia e soluções aferidas

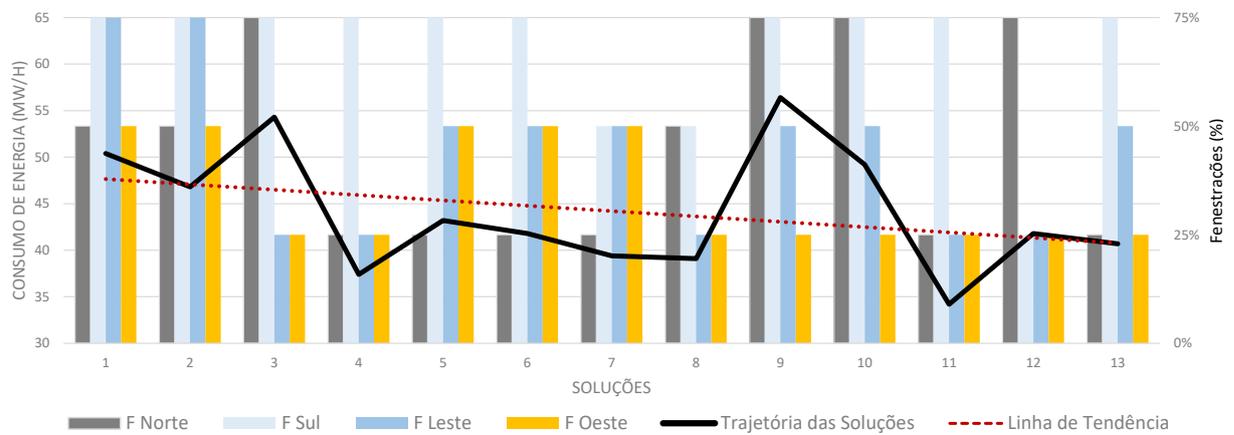


Fonte: elaborado pela autora.

A linha de tendência é representada pelo traçado pontilhado, vermelho, enquanto o itinerário das soluções simuladas é retratado através da linha preta contínua. O traçado das soluções, representando a trajetória dos resultados e sua relação com o desempenho, é ilustrado pontualmente, sempre que uma solução foi aferida. Os dados numéricos descritos no gráfico acompanham a respectiva imagem, a qual se realizou a simulação do desempenho energético. Todas as imagens, representadas neste gráfico, correspondem à perspectiva sudoeste da solução aferida. A perspectiva que encontra-se circulada em amarelo, no gráfico, refere-se a solução que o participante julgou mais adequada após o término do exercício. Ou seja, depois de percorrer todas as soluções aferidas, o usuário avaliou os dados quantitativos de desempenho e ponderando os anseios quanto à geometria e outros fatores, como ventilação, permeabilidade visual e demais conhecimentos, o aluno elegeu uma solução para possível prosseguimento do processo de projeto.

O segundo mapa (Figura 28) é representado por um gráfico de barras e correlaciona o consumo de energia para aquecimento e refrigeração das soluções, e a porcentagem das aberturas nas suas respectivas fachadas (norte, sul, leste e oeste). Para relacionar o primeiro e segundo gráfico, inseriu-se a representação da trajetória das soluções e a linha de tendência, geradas pelo primeiro gráfico.

Figura 28 Exemplo de gráfico correlacionando consumo de energia e porcentagem adotada para as fenestraçãoes



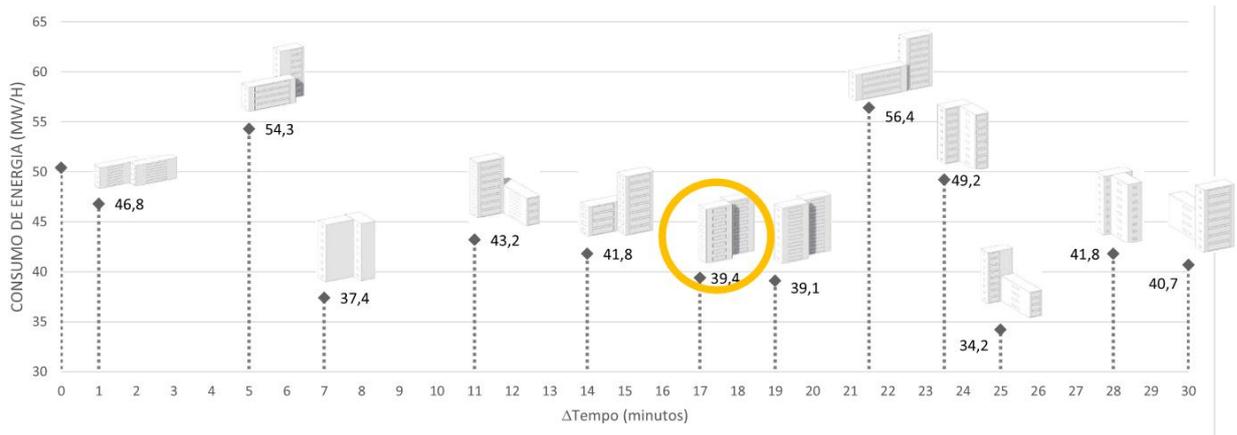
Fonte: elaborado pela autora.

As cores adotadas para o gráfico de barras, cinza escuro, azul claro, azul escuro e amarelo, representam, respectivamente, a porcentagem de aberturas nas fachadas norte, sul, leste e oeste. O gráfico identifica possíveis relações existentes entre as decisões de projeto adotadas para as fenestraçãoes ao longo do processo projetual, correlacionando recorrência e alterações do parâmetro fenestração nas quatro fachadas, minimização do consumo, sequência das ações adotadas durante os trinta minutos do experimento.

O terceiro gráfico adotado para a tabulação dos dados (Figura 29) correlaciona o intervalo de tempo e o consumo de energia para aquecimento e refrigeração das soluções adotadas ao longo do exercício projetual. Através da representação gráfica identificam-se as relações entre o intervalo de tempo e o desempenho das alternativas, possibilitando observar os momentos que é requerido maior ou menor tempo permitindo, também, avaliar a relação do tempo com as geometrias simuladas e com a solução selecionada ao final do exercício,

representada pelo círculo amarelo. Assim como no primeiro gráfico, as ilustrações do gráfico correspondem à perspectiva sudoeste, como referência de representação para todas as análises dos dados.

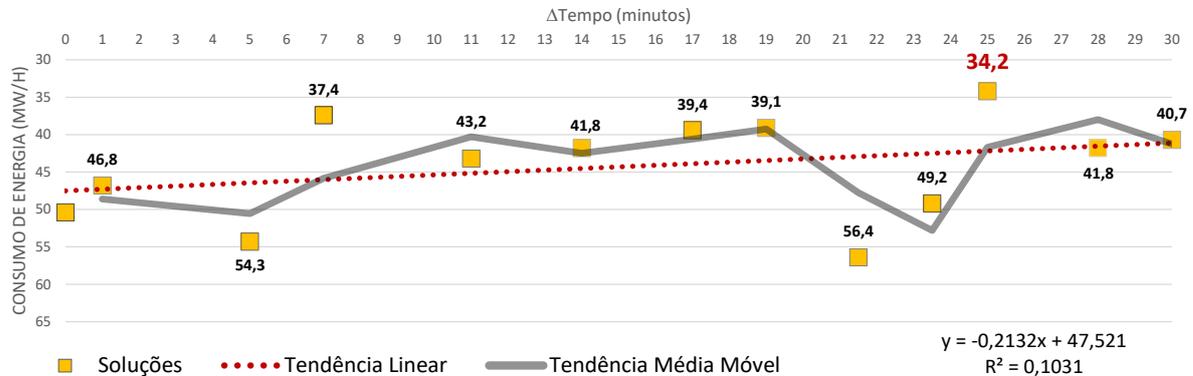
Figura 29 Exemplo gráfico correlacionando consumo de energia e tempo entre cada simulação



Fonte: elaborado pela autora.

O quarto gráfico de representação dos dados coletados (Figura 30) utiliza como instrumento de análise a linha de tendência, estabelecendo um prognóstico parcial do processo de aprendizagem dos participantes. Adotaram-se as linhas de tendência média móvel e linear para ilustrar possíveis padrões e/ou configurações excepcionais do processo de aprendizagem. A linha de tendência deste gráfico (Figura 30) diferencia-se dos gráficos anteriores, pois os dados de consumo de energia estão em ordem decrescente. O posicionamento decrescente dos dados de desempenho deve-se ao objetivo proposto pelo exercício de reduzir o consumo de energia. Deste modo, à medida que o usuário direciona as soluções aferidas para a redução de consumo, a linha de tendência demonstra a relação entre aprendizagem e objeto de estudo, em consequência do tempo transcorrido. Quando o usuário direcionar as soluções para a diminuição do consumo de energia, a linha de tendência evidencia a aquisição de conhecimento e desenvolvimento do traçado da aprendizagem.

Figura 30 Exemplo de Gráfico com Curvas de Tendência, representando a sequência das soluções de projeto em relação ao consumo de energia



Fonte: elaborado pela autora.

A linha de tendência, apresentada pelos usuários, para a geração de soluções, demonstra a convergência das simulações em relação à tomada de decisões. A Linha de Tendência média móvel, representada pela linha contínua cinza, visa suavizar a flutuação dos dados, mostrando um padrão ou tendência mais clara das informações. A média móvel é definida pelo período dois, determinando que a média é executada em relação aos pontos de dados. A linha de tendência de média móvel, adotada neste gráfico segue a equação, segundo modelo do Microsoft Excel:

$$F_t = \frac{A_t + A_{t-1} + \dots + A_{t-n+1}}{n}$$

O número de pontos da linha de tendência gerada é igual ao número total de pontos da série, menos o número especificado para o período, neste caso, 2. Ou seja, a linha de tendência média móvel, traça a média entre os pontos, seguindo a sequência do gráfico. A linha de tendência média móvel demonstrou ser mais adequada para representar a convergência das soluções de projeto ao longo do tempo, pois os dados de simulação energética resultantes possuem variações acentuadas, com grande amplitude entre um resultado de simulação e outro.

A linha de tendência linear é apropriada para ajustar dados lineares simples, demonstrando a tendência dos dados ao longo de um período de tempo. Poucos participantes apresentaram um conjunto de dados com linearidade, enquanto a

maioria obteve amplas variações dos dados de consumo de energia. A tendência linear afasta-se da representação fidedigna dos dados, pois a maior parte dos gráficos apresenta alto ajuste quadrado para a linha de tendência. A equação utilizada pela linha de tendência linear visa representar o aumento ou diminuição de uma taxa constante, onde m é a inclinação e b representa a intersecção:

$$y = mx + b$$

Quanto mais próximo de 1 for o valor de R-quadrado, mais adequado será o ajuste da linha com os dados. Como a maior parte das linhas de tendência lineares apresentadas pelos participantes do exercício, aproximam-se de 0, menor é o ajuste da tendência com os dados. Deste modo, em algumas situações a tendência linear distancia-se dos dados gerados, apresentando inconsistências relatadas quando analisadas as ações de projeto individuais dos participantes. O resultado de R^2 , descrito no canto inferior direito, juntamente com a aplicação da equação de primeiro grau (Figura 30), demonstra o distanciamento entre o ajuste dos pontos máximos e mínimos do gráfico, já que o valor apresentado aproxima-se de zero.

Para analisar a relação entre as linhas de tendência e resultados apresentados nos quatro gráficos descritos, realizou-se o mapeamento de procedimentos. O mapeamento consiste na descrição das ações projetuais realizadas entre cada solução aferida. O mapa de ações objetivou narrar o trajeto que cada participante utilizou como estratégia para alterar a forma em busca de soluções eficientes. Estes mapas demonstraram graficamente os parâmetros que têm maior impacto sobre o desempenho, como o uso maior ou menor de determinada regra de transformação, verificando se existe algum padrão comportamental entre as ações dos participantes. Todos os mapas gerados encontram-se no Apêndice G.

O preenchimento do gabarito realizado individualmente pelos participantes, e as capturas da tela permitiram registrar a sequência das ações de projeto. O mapeamento das ações projetuais segue o registro das variáveis: proporção das aberturas, translação e rotação dos prismas, e consumo de energia. O mapa de procedimentos é composto por ícones que representam 11 variáveis de projeto, conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2 Lista de variáveis com a representação gráfica em ícones para a estruturação do Mapa de Procedimentos

Legenda	
Translação	
Rotação xy	
Rotação yz	
Aumento FN	
Redução FN	
Aumento FS	
Redução FS	
Aumento FL	
Redução FL	
Aumento FO	
Redução FO	

Fonte: elaborado pela autora.

O registro das ações de projeto, representado graficamente pelos ícones através da quantidade e sequência de variáveis adotada por cada participante, originou uma lista, organizada por uma tabela no Microsoft Excel (Tabela 3), da qual foi possível verificar indicadores do processo de projeto, como o maior ou menor uso de determinada variável, a sequência das ações adotadas, a quantidade de ações utilizadas entre simulação e a quantidade total de ações e suas reproduções. Cada linha da tabela representa uma sequência de manipulações realizadas, enquanto as colunas representam a sequência dos procedimentos adotados e o desempenho após cada série de ações.

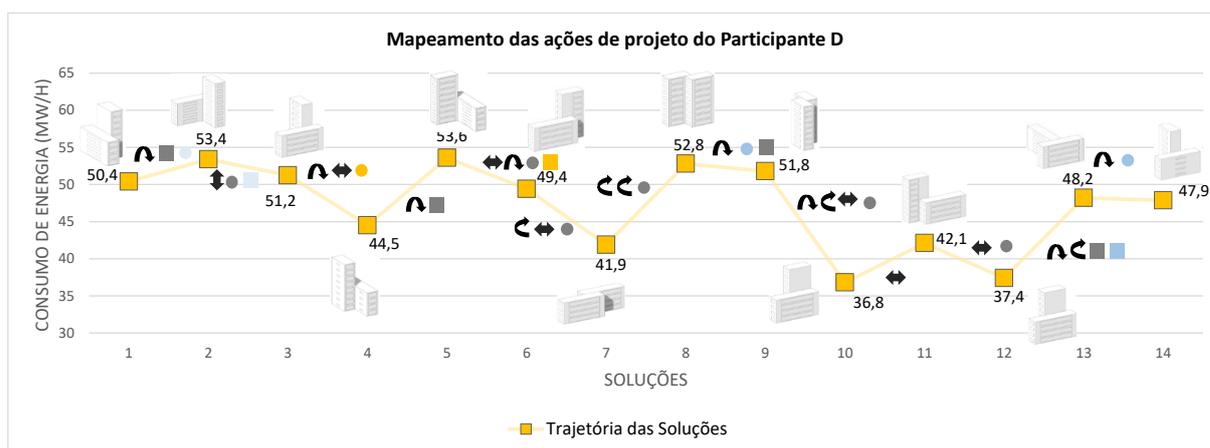
Para associar o mapa de procedimentos à representação gráfica das formas geradas, elaborou-se um gráfico (Figura 31) de representação com a sequência das ações de projeto e os resultados gráficos e numéricos decorrentes dos procedimentos adotados em cada ciclo. A representação gráfica do mapeamento de ações foi utilizada pontualmente, ou seja, para alguns participantes, visando a identificação dos indivíduos que apresentassem resultados que afastavam-se do padrão identificado.

Tabela 3 Exemplo de um Mapa de Procedimento

Mapa de Procedimentos - Participante D				
Seqüência	Ações Projetuais			Consumo (MW/h)
1	↻	■	●	53,4
2	↔	●	■	51,2
3	↻	↔	●	44,5
4	↻	■		53,6
5	↔	↻	●	49,4
6	↻	↔	●	41,9
7	↻	↻	●	52,8
8	↻	●	■	51,8
9	↻	↻	↔	36,8
10	↔			42,1
11	↔	●		37,4
12	↻	↻	■	48,2
13	↻	●		47,9

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 31 Exemplo de gráfico com a seqüência das ações de projeto e os resultados gráficos e numéricos decorrentes dos procedimentos adotados



Fonte: elaborado pela autora.

A determinação de uma seqüência projetual, representada no mapa de procedimento, é definida pelo momento em que solicitou-se a simulação do consumo de energia (MWh). O consumo de energia adotado pondera a média anual do modelo de desempenho, considerando o consumo de energia médio para

aquecimento e refrigeração. A cada segmento de reta, ou seja, a cada geometria simulada, permite-se a visualização das ações que geraram tal resultado, assim como a quantidade de alterações realizadas para solicitar nova simulação e verificar se a estratégia adotada procedeu conforme esperada.

Os dados coletados durante o experimento foram sintetizados em quatro gráficos e um mapa de procedimentos por participante, totalizando 84 gráficos e 21 mapas registrando as ações de projeto. A partir do registro e organização de todos os dados coletados, analisaram-se os resultados obtidos pelo experimento.

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O exame dos dados coletados durante o experimento analisou a verbalização do processo projetual, identificando como os participantes enfrentaram a tarefa de minimizar o consumo energético juntamente com a exploração da forma do envoltório e proporção das fenestrações. A verbalização do processo de projeto ocorre através da identificação dos padrões de comportamento, juntamente com a avaliação das respostas obtidas nos questionários e ações de projeto, identificadas pelos gráficos e mapas de ações projetuais.

Ao avaliar o processo de projeto objetivava-se determinar a relação entre as ações de projeto e desempenho, quantificar as ações projetuais e sua relação com o tempo e performance, identificar se a quantidade de soluções geradas contribuiu para a minimização do consumo de energia para aquecimento e refrigeração, analisar o uso do PASA e se a busca da minimização do consumo em etapas iniciais influenciou na forma de edificações comerciais.

A análise do experimento recebeu duas abordagens: quantitativa e qualitativa. A análise quantitativa expôs a relação entre as variáveis: tempo, transformações geométricas – rotação, translação e escala – forma e desempenho das soluções alcançadas pela amostra. A análise qualitativa identificou procedimentos e estratégias da tarefa de minimização do consumo de energia, não detectados pela análise quantitativa. A avaliação qualitativa relacionou dados dos questionários e do gabarito preenchido durante o exercício projetual e identificou padrões de comportamento através dos vídeos e gravações.

3.1 Análise quantitativa

A análise quantitativa teve como objetivo associar dados de transformação geométrica ao desempenho alcançado pelas soluções dos alunos durante o uso do PASA, através de gráficos e associações de dados. É uma análise global e ampla sobre ações cognitivas que intervêm no desempenho. A análise quantitativa buscou

identificar a recorrência e impacto com que a tarefa de minimização do consumo de energia exerce em EIP, porém, sem comparar o desempenho entre participantes.

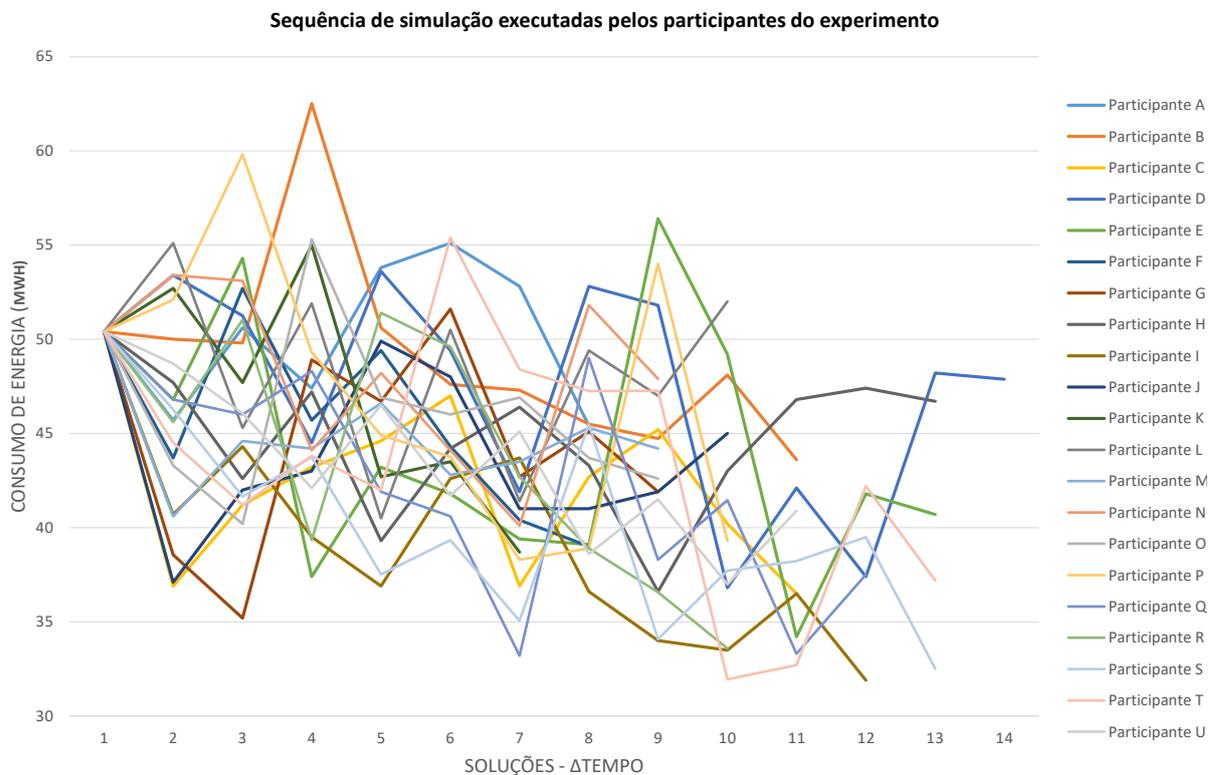
A análise das transformações que repercutiram na minimização do consumo de energia para aquecimento e refrigeração de edificações comerciais teve como dados principais a quantidade de soluções apresentadas por cada indivíduo da amostra, os intervalos de tempo, as ações projetuais e as respostas contidas nos questionários.

3.1.1 Dados Gerais de Desempenho

A busca da minimização do consumo de energia para aquecimento e refrigeração, auxiliada pela associação entre modelo físico e digital, apresentou a recorrência e variação de alguns aspectos gerais.

O gráfico representado na Figura 32 apresenta os dados gerais de desempenho atingido pelos participantes. Nele é apontado o número total de soluções simuladas por cada participante, dentro do tempo total do experimento. O gráfico ilustra a dificuldade para estabelecer uma estratégia linear, na busca pela redução do consumo de energia. Observa-se oscilação (aumento e diminuição do consumo de energia) durante o percurso projetual dos participantes (Figura 32). No entanto, evidencia-se a redução do consumo de energia como uma tendência ao longo do processo de projeto da maioria dos graduandos. Mesmo que o processo de projeto seja caracterizado pela variação de picos e vales no consumo, o gráfico demonstra convergência de minimização do consumo. Este fato demonstra que demora algum tempo para os alunos se familiarizarem com a ferramenta, mas após alguns minutos de interação exploraram suas potencialidades.

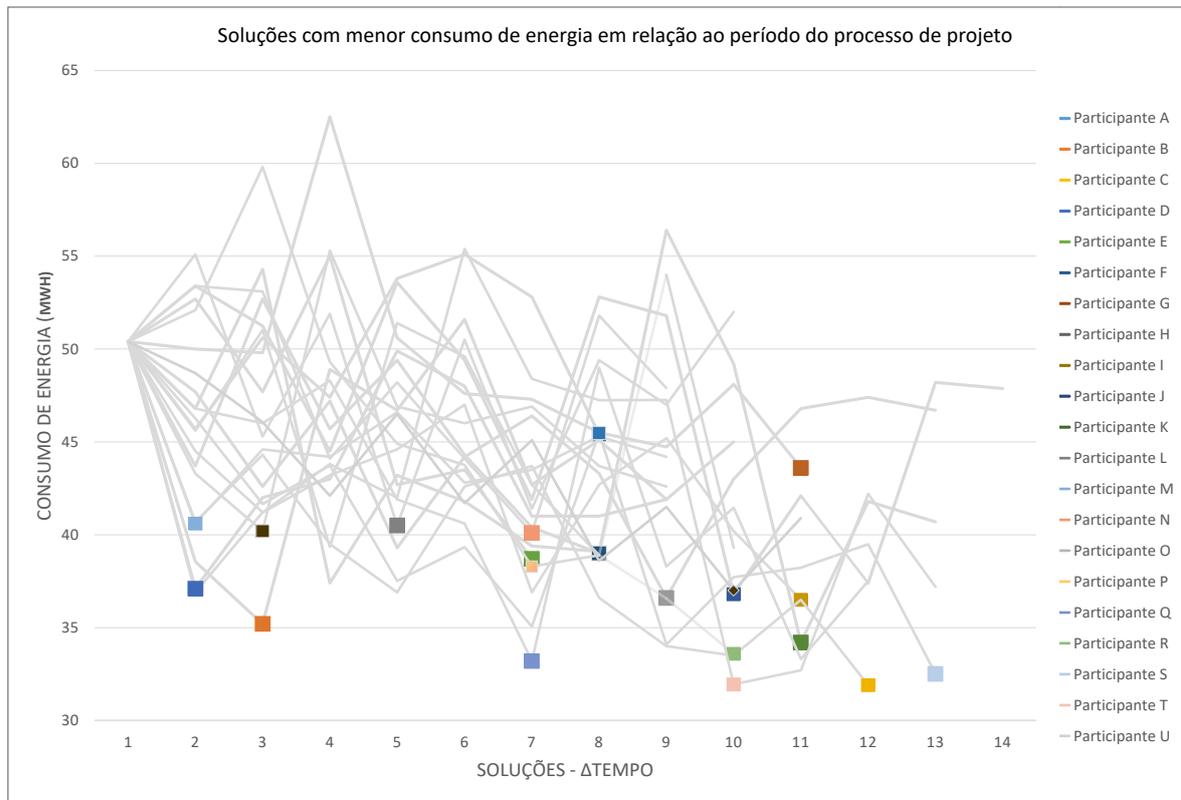
Figura 32 Gráfico mostrando o percurso gerado por cada participante de acordo com o consumo de energia e quantidade total de soluções simuladas



As soluções mais eficientes são encontradas a partir da sétima solução aferida (Figura 33). Apenas 23,8% dos usuários localizaram uma solução eficiente antes da sexta simulação e 76,2% obtiveram a solução mais satisfatória após a sexta geração.

Independentemente de terem sido instrumentalizados pelas mesmas ferramentas e partido de uma forma inicial análoga, os participantes geraram soluções consideravelmente distintas, tanto sob o aspecto geométrico, quanto sob o desempenho. O gráfico da Figura 34 apresenta um histograma com os dados quantitativos e imagem das geometrias, encontradas pelos participantes, com menor consumo de energia.

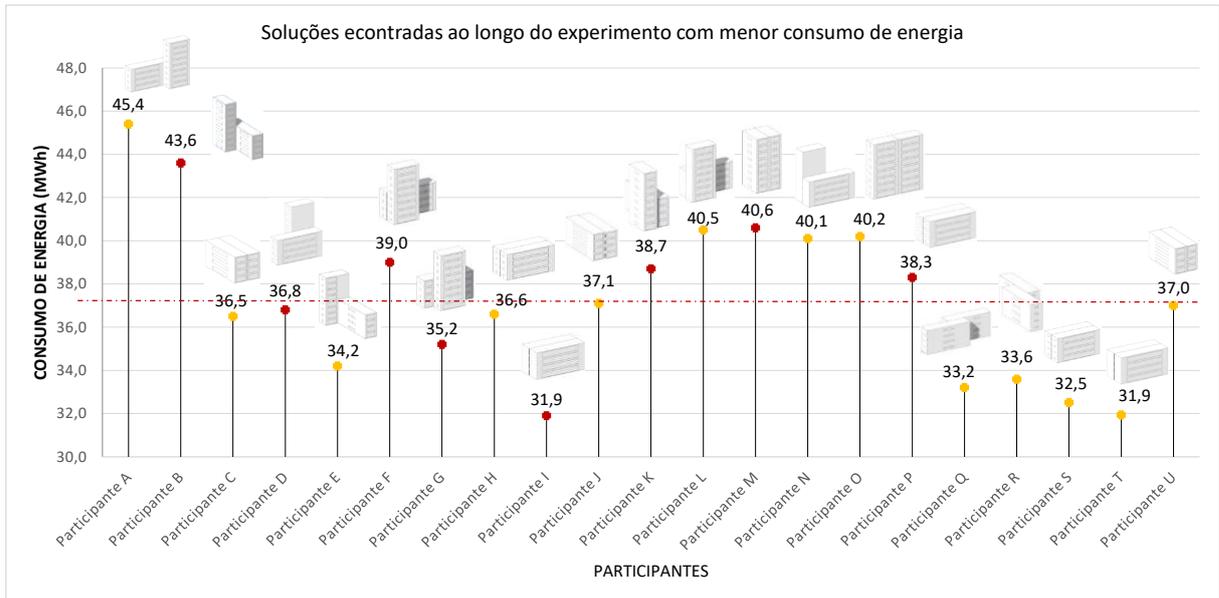
Figura 33 Gráfico mostrando o período em que as soluções com menor consumo de energia foram simuladas



Fonte: elaborado pela autora.

Ao analisar as soluções com menor consumo de energia delimita-se o consumo de energia médio: 37MWh, resultante da média harmônica da amostra. A média harmônica, representada pela linha tracejada vermelha (Figura 34), pondera o valor da solução mais eficiente de cada participante. A solução com menor consumo de energia para aquecer e refrigerar o ambiente interno variou minimamente entre os participantes 'E', 'I', 'Q', 'R', 'S' e 'T', expondo o distanciamento da linha média. Enquanto, os participantes 'C', 'D', 'F', 'G', 'H', 'J', 'K', 'P' e 'U' obtiveram resultados inferiores ou superiores a média, mas aproximando-se sempre da linha média de consumo traçada pela amostra. Já os participantes 'A', 'B', 'L', 'M', 'N' e 'O', afastaram-se consideravelmente da redução média do consumo da amostra, apresentando resultados acima de 40MWh de consumo de energia anual.

Figura 34 Gráfico mostrando as soluções geométricas com menor consumo de energia encontradas por participante e linha representando a média



Fonte: elaborado pela autora.

Ao todo foram realizadas 201 simulações (Figura 35): trinta soluções apresentaram consumo igual ou inferior a média (37MWh), cinquenta e quatro alternativas registraram o consumo de energia entre 38MWh e 42MWh, e o restante excedeu 43MWh de consumo (Apêndice I). No total, vinte e nove soluções excederam o consumo de energia em relação à forma inicial (50,4MWh) e cento e setenta e duas simulações realizadas reduziram o consumo de energia.

Todos os participantes reduziram o consumo, considerando a forma inicial com 50,4 MWh de desempenho. Um percentual representativo de 10% da amostra reduziu até 6,8 MWh de energia, enquanto os demais conseguiram reduzir 18,5 MWh. Mais de 90% da amostra obteve consumo de energia anual para aquecer e resfriar o ambiente interno igual ou menor que 40 MWh e doze participantes obtiveram resultados inferiores ou iguais a média, 37 MWh de consumo de energia anual. Dentre as soluções geométricas estabelecidas pelos participantes com consumo de energia igual ou inferior a 37 MWh, nove apresentaram os dois prismas na situação horizontal (maior área de projeção sobre o solo) e somente três exploraram a alternância entre prisma vertical e prisma horizontal (Figura 34).

Figura 35 Soluções geométricas simuladas pela amostra durante exercício projetual



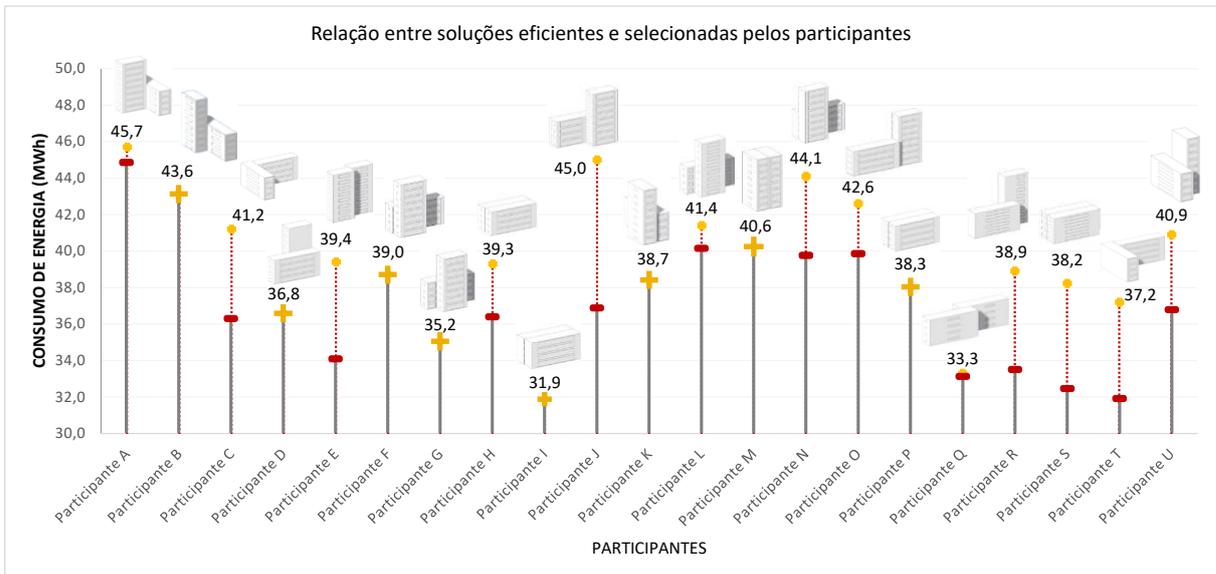
Fonte: elaborado pela autora.

Dentre as formas com melhor desempenho, duas utilizam a verticalização de ambos os prismas, demonstrando que a maior parcela da amostra interpretou a relevância entre a compactação horizontal dos prismas e o dimensionamento das aberturas. A compactação horizontal dos prismas, obtendo maior superfície em contato com o solo, e a redução das áreas de abertura nas fachadas foram os atributos que resultaram em maior impacto da redução do consumo.

Ao final do exercício proposto para o experimento, os participantes foram estimulados a definir as geometrias com maior potencial em caso de prosseguir com o processo de projeto, considerando variáveis qualitativas de projeto, além do consumo de energia. O histograma apresentado na Figura 36 ilustra as soluções geométricas selecionadas pela amostra, demonstrando que apenas sete participantes optaram pela solução com melhor desempenho se tivessem que prosseguir com o processo projetual. Os demais consideraram a avaliação do desempenho como uma ferramenta de auxílio a tomada de decisões, mas ponderaram outros aspectos como a amplitude das aberturas (para melhor conforto natural – iluminação, ventilação – permeabilidade visual) e caráter estético de exploração da forma. Ou seja, em sua maioria, os participantes ponderaram, também, outros aspectos de projeto, conforme a experiência projetual adquirida anteriormente, ao longo da carreira acadêmica, e optaram por uma solução equilibrada de energia, dentre as alternativas geradas durante o processo.

A relação entre as geometrias selecionadas pelos participantes e as soluções mais eficientes de cada processo projetual é demonstrada através da barra vermelha que representa, na coluna dos participantes, as soluções com menor consumo de energia para aquecimento e refrigeração de acordo com o processo heurístico do estudante (Figura 36). Os círculos amarelos representam as soluções geométricas escolhidas pelos participantes, ponderando os dados quantitativos de desempenho energético e fatores qualitativos, como permeabilidade visual, ventilação, integração entre ambiente interno e externo, iluminação natural, entre outros. As soluções representadas através do ícone “+” em amarelo correspondem às soluções dos participantes que julgaram que a forma com menor consumo de energia seria a melhor opção para o partido arquitetônico.

Figura 36 Gráfico mostrando a relação entre as soluções selecionadas pelos participantes e as soluções mais eficiente encontrada durante seu processo projetual



Fonte: elaborado pela autora.

De modo geral, os participantes do experimento aproximaram-se da solução com menor consumo de energia, ou mantiveram-se próximos da média de consumo geral; com exceção do participante 'J' (Figura 36) que gerou soluções próximas da média, mas selecionou como potencial partido arquitetônico uma estratégia cujo consumo de energia foi 18% maior do que a média.

A manipulação dos prismas antecede a alteração da proporção das aberturas (Apêndice G). Predominantemente, os usuários alteram, inicialmente, a relação entre os prismas, através de rotações e translações, e posteriormente, passam a alterar a proporção, escala das aberturas. A observação do processo de projeto, guiado pela identificação das ações, também possibilitou a quantificação e mapeamento das ações, estabelecendo relações entre a tomada de decisões e o desempenho alcançado.

3.1.2 Quantidade de Soluções

Os participantes que realizaram uma quantidade maior de simulações apresentaram soluções mais eficientes. A tabela 4 ilustra essa relação, demonstrando que apenas um usuário, participante G, obteve 37 MWh de desempenho energético, simulando menos de dez alternativas.

Tabela 4 Tabela com a quantidade total de soluções aferidas e resultado da simulação com menor consumo de energia obtido por participante

Ref	Participantes	Desempenho (minimização CE)	Simulações realizadas
1	Participante I	31,9 MWh	11
2	Participante T	31,94 MWh	12
3	Participante S	32,51 MWh	12
4	Participante Q	33,2 MWh	11
5	Participante R	33,59 MWh	9
6	Participante E	34,2 MWh	12
7	Participante G	35,2 MWh	8
8	Participante C	36,5 MWh	10
9	Participante H	36,6 MWh	12
10	Participante D	36,8 MWh	13
11	Participante J	37,1 MWh	9
12	Participante P	38,3 MWh	9
13	Participante U	38,6 MWh	10
14	Participante K	38,7 MWh	6
15	Participante F	39,0 MWh	7
16	Participante N	40,1 MWh	8
17	Participante O	40,2 MWh	8
18	Participante L	40,5 MWh	9
19	Participante M	40,6 MWh	8
20	Participante B	43,6 MWh	10
21	Participante A	45,4 MWh	7
Média		37	9

Fonte: elaborado pela autora.

A média de soluções aferidas, avaliando os valores gerais retratados pela amostra, totalizou nove simulações, e o desempenho médio obtido, como descrito anteriormente, resultou em 37 MWh para o consumo de energia, quanto ao aquecimento e refrigeração do ambiente interno (Tabela 4). Os dois usuários que obtiveram o menor consumo de energia para aquecer e refrigerar o ambiente (31,9MWh), simularam 11 e 12 alternativas para alcançar a performance estabelecida. Enquanto o usuário que apresentou o maior gasto de energia aferiu sete formas. Apenas um participante conseguiu simular 13 soluções dentro dos 30 minutos, sendo que mais de 70% dos participantes aferiu entre 8 e 12 formas. Um participante apenas, simulou 6 soluções e outros dois encerraram o exercício com 7 formas aferidas.

Auxiliado por ambiente de simulação, o processo heurístico dos participantes que atingiram os melhores resultados de minimização para o consumo de energia, foram aqueles que apresentaram maior número de simulações. Os alunos que obtiveram os resultados inferiores de desempenho energético realizaram menos simulações, com exceção do participante 'B', que aferiu dez estratégias e obteve o segundo maior consumo da amostra.

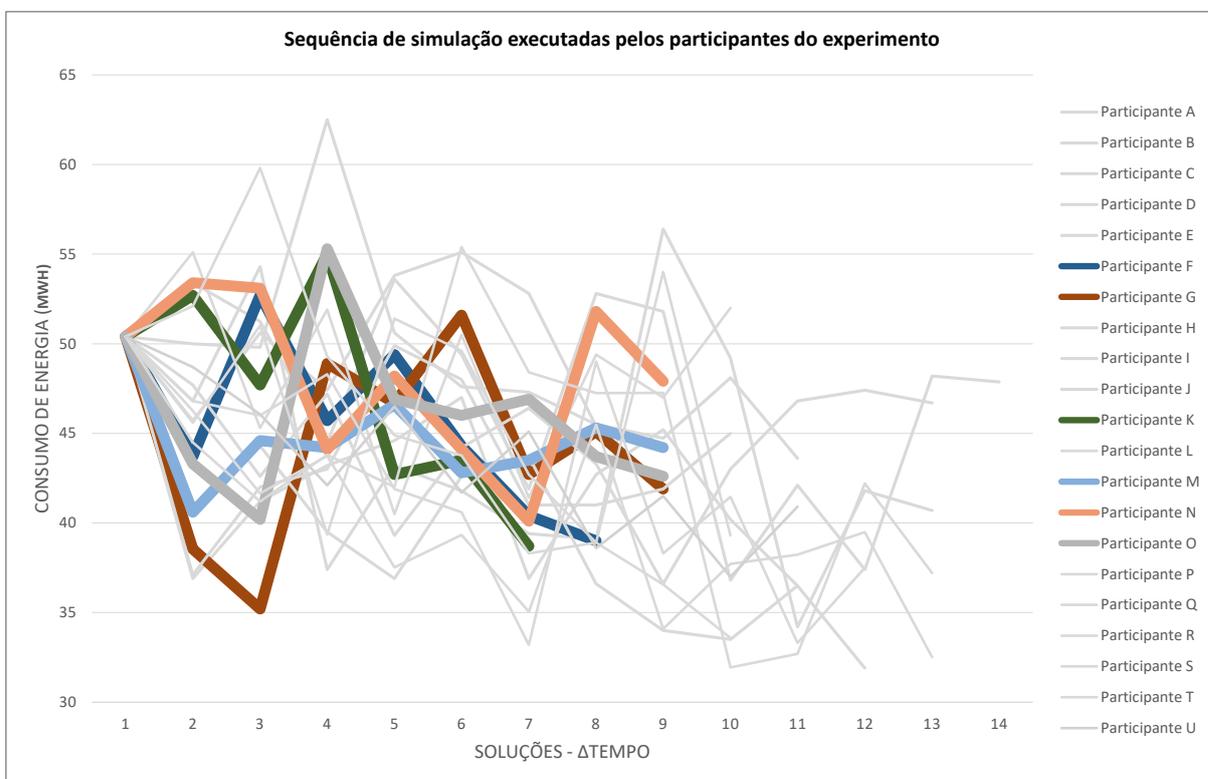
Ao final do exercício, ao serem convidados a observar as soluções geradas ao longo do experimento, 38% dos participantes selecionaram a solução mais eficiente como solução em potencial para prosseguir com o partido arquitetônico (Figura 36), demonstrando que variáveis geométricas e outros aspectos arquitetônicos, como permeabilidade visual, iluminação, ventilação natural e proteção solar, já estavam sendo consideradas durante o processo de tomada de decisões. Enquanto os participantes que não selecionaram a solução mais eficiente (como solução em potencial para o partido arquitetônico), demonstrando que nem sempre ao simular uma alternativa de projeto, estavam considerando todos os aspectos arquitetônicos que julgavam importante para um partido arquitetônico.

O fator tempo influenciou diretamente a quantidade de soluções geradas, uma vez que para seguir o protocolo de simulação no ambiente digital os usuários necessitavam entre 25 segundos e 1 minuto. Mesmo que fornecido um passo a passo com as 4 etapas do protocolo – salvar a geometria, selecionar *internalize data*, desligar a câmera e conectar a solução ao modelo de desempenho – alguns usuários necessitaram de mais tempo para habituar-se com a interface gráfica

apresentada enquanto a maioria da amostra executou com agilidade a interface, necessitando de apenas alguns segundos.

O preenchimento do gabarito e o esboço do croqui das soluções simuladas também influenciou no tempo dispendido por cada participante entre uma simulação e outra. Como mostra o gráfico da Figura 37, os seis participantes com a menor quantidade de soluções aferidas tiveram as mesmas ferramentas condições e tempo para executar a tarefa proposta pelo experimento.

Figura 37 Gráfico mostrando o percurso gerado pelos seis participantes com menor número de soluções aferidas.



Fonte: elaborado pela autora.

O impacto que o tempo de uso do ambiente exerce sobre a quantidade de soluções é analisado na próxima seção, foca na relação entre o tempo e desempenho alcançado nas soluções propostas pela amostra.

3.1.3. Tempo

O tempo da tarefa não foi, inicialmente, considerado uma variável durante o experimento, já que todos os usuários receberam cada um, trinta minutos para a manipulação da forma em busca da minimização do consumo de energia. No entanto, observou-se a demanda de tempo variável para utilizar o ambiente e o tempo gasto entre as simulações. Tendo isto em vista, buscou-se identificar possíveis dificuldades do usuário em manipular o problema fornecido pelo exercício e utilizar o PASA.

O tempo de preenchimento do protocolo de simulação variou entre os participantes do exercício. A maioria dos usuários necessitou menos de 30 segundos para realizar o procedimento, enquanto os participantes que encontraram um pouco de dificuldade com a interface despenderam entre 60 a 120 segundos. O comportamento do computador utilizado e o preenchimento do gabarito também influenciaram no tempo de execução do procedimento no ambiente digital. Para alguns participantes, após conectar a geometria ao modelo digital, houve dificuldade em processar a informação, dificultando o momento de clicar *internalize data*. Como toda a amostra utilizou o mesmo computador não foi possível identificar a origem da dificuldade de alguns dos participantes. Para suprir o tempo eventual de demora do processador pausava-se o cronômetro e reiniciava-se após a volta da normalidade do processamento.

Após a execução do protocolo, consentiu-se que o modelo digital processasse os dados da simulação. Dado o modelo geométrico de zona única e modelo de desempenho simplificado, o cálculo da simulação demandou entre 45 segundo e 1,1 minutos. No total, o tempo necessário para manipular o modelo físico, realizar o protocolo de solicitação do desempenho, preencher o gabarito com croquis e obter a resposta da simulação, situou-se entre dois e sete minutos. No Apêndice F, a variação do tempo pode ser observada através da tabela geral dos dados de cada participante da amostra, assim como pela sequência de gráficos correlacionando tempo e desempenho. Mais de 70% dos usuários compreendeu com facilidade a interface digital e explorou com rapidez o protocolo de simulação. Alguns alunos apresentaram maior clareza e agilidade do que outros ao tomar as decisões, definindo princípios e estratégias com maior objetividade. Conseqüentemente,

otimizaram o tempo, simulando uma quantidade maior de soluções e, em alguns casos, com resultados expressivos de minimização do consumo de energia. Esta abordagem é descrita na análise qualitativa, no item 0.

Figura 38 Gráfico mostrando o período em que as soluções com menor consumo de energia foram simuladas ao longo do processo de projeto

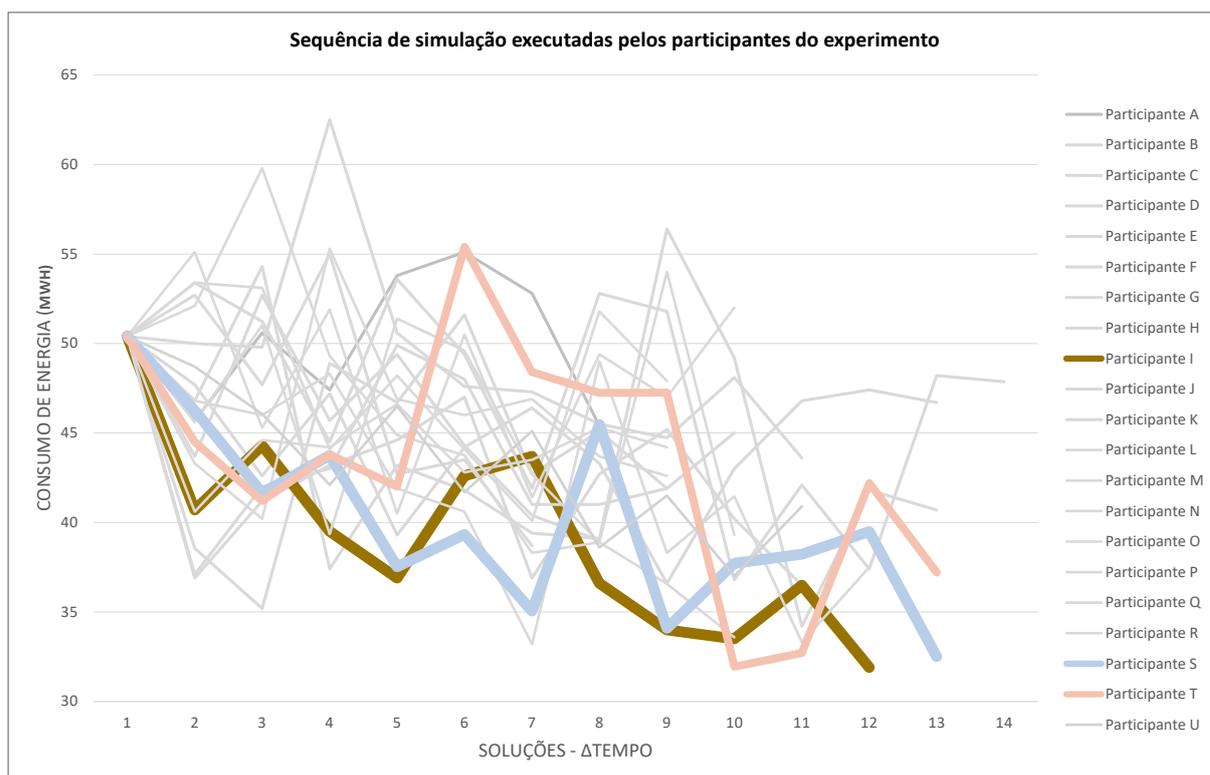


Fonte: elaborado pela autora.

O gráfico de representação do processo de projeto (Figura 38) – delimitado pelas estratégias simuladas – permite comparar os resultados da amostra, verificando em que ponto do processo de projeto há recorrência de soluções que minimizem expressivamente o consumo de energia. As soluções com melhor desempenho energético, apresentadas individualmente pelos usuários, localizam-se em estágios intermediários ou finais do processo de simulação. Seis alunos obtiveram uma solução otimizada nos primeiros dezesseis minutos do experimento, enquanto os demais, quinze alunos, encontraram estratégias melhores com o uso do ambiente proposto pela tese em etapas subsequentes. Dentre esses quinze alunos,

seis apresentam os melhores resultados para a redução do consumo de energia, enquadrando-se abaixo de 35MWh de consumo anual.

Figura 39 Gráfico mostrando o percurso gerado pelos três participantes com os resultados mais expressivos de minimização do consumo de energia



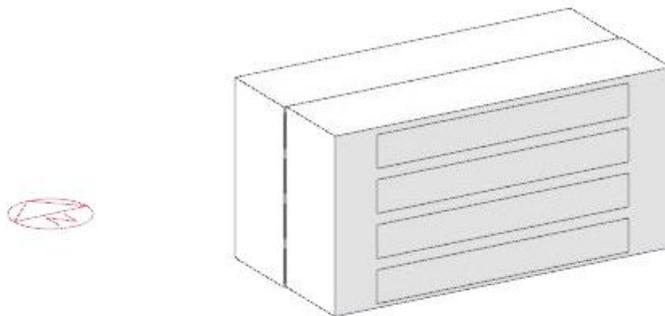
Fonte: elaborado pela autora.

Os três percursos projetuais com resultados mais expressivos sob o aspecto da minimização do consumo de energia, representados em destaque pelo gráfico da (Figura 39) evidenciam os picos de alteração do consumo de energia durante o processo de projeto e demonstram a minimização do consumo após a nona simulação. Os três usuários – ‘I’, ‘S’ e ‘T’ – exploraram mais de onze soluções, alcançando as soluções de maior eficiência entre a 10ª e 13ª aferições. O tempo de projeto, evidenciado pela quantidade de simulações realizadas nestes três casos, contribui para a manifestação de soluções eficientes.

Os dois usuários que alcançaram maior índice de redução do consumo de energia, participantes ‘I’ e ‘T’, obtiveram a mesma solução, com 31,9 MWh de desempenho (Figura 40): um volume único, composto pelos dois prismas na

horizontal e com 25% de abertura nas fachadas norte e leste, 75% na fachada sul e a fachada oeste completamente fechada. O processo inicial de simulação foi rápido, em que um fez a primeira simulação com apenas um minuto do início do exercício, e o outro demorou dois minutos e meio. O participante 'I' aferiu no total, onze estratégias além da forma inicial e chegou na melhor solução nos últimos três minutos do tempo disponibilizado para a atividade. O participante 'T' explorou doze soluções, no entanto, a forma simulada com melhor desempenho foi à nona alternativa aferida.

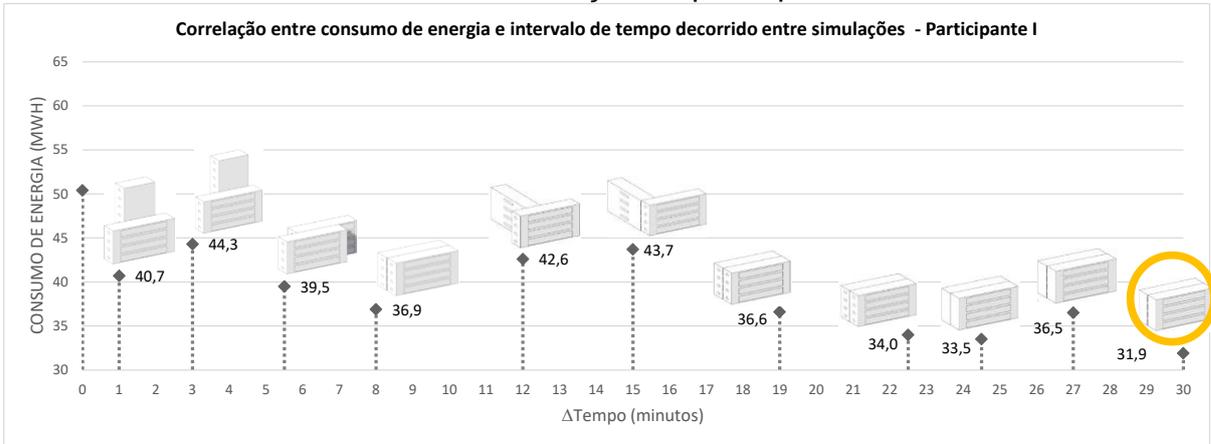
Figura 40 Geometria com desempenho mais eficiente, proposta pelos participantes 'I' e 'T'



Fonte: elaborado pela autora.

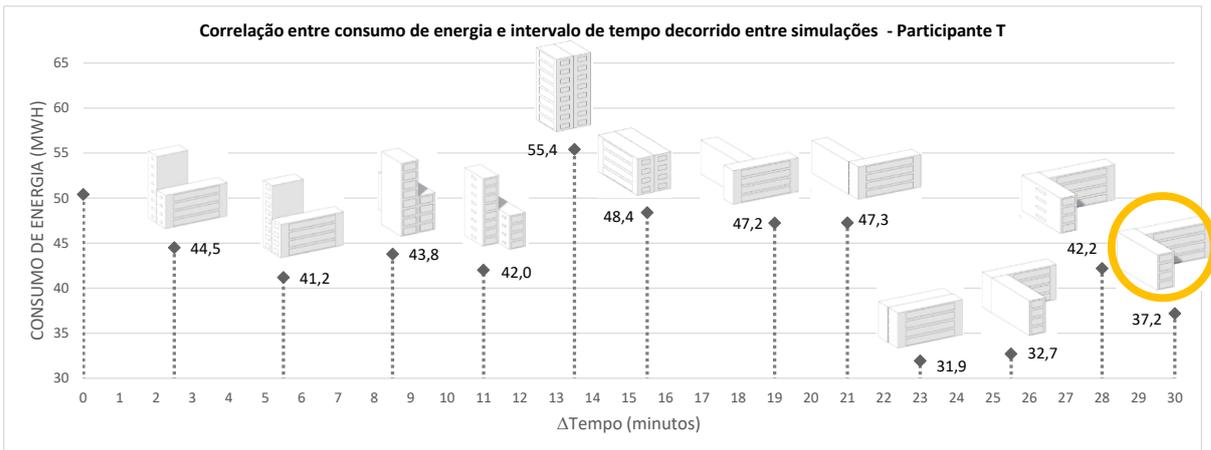
O consumo de energia das soluções aferidas e o tempo decorrido entre cada simulação mantém um padrão similar para a maioria dos usuários, conforme detalhado pelos dados descritos no Apêndice F. Através do gráfico de representação do tempo em relação ao desempenho do Participante 'I' (Figura 41) e do participante 'T' (Figura 42), pode-se examinar a questão. A frequência de tempo entre as simulações mantém uma variação semelhante, ou seja, o tempo entre uma simulação e outra segue o mesmo padrão. Mesmo quando a estratégia é modificada, alterando-se, simultaneamente, aberturas em mais de uma fachada e manipulando a volumetria, o tempo entre as simulações mantém um padrão, praticamente constante.

Figura 41 Gráfico correlacionando consumo de energia (MWh) e tempo (minutos) entre cada simulação do participante 'I'



Fonte: elaborado pela autora.

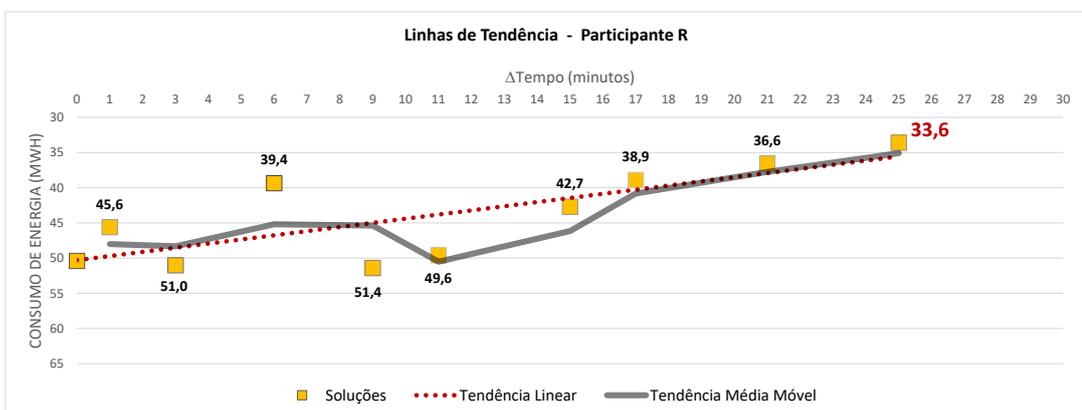
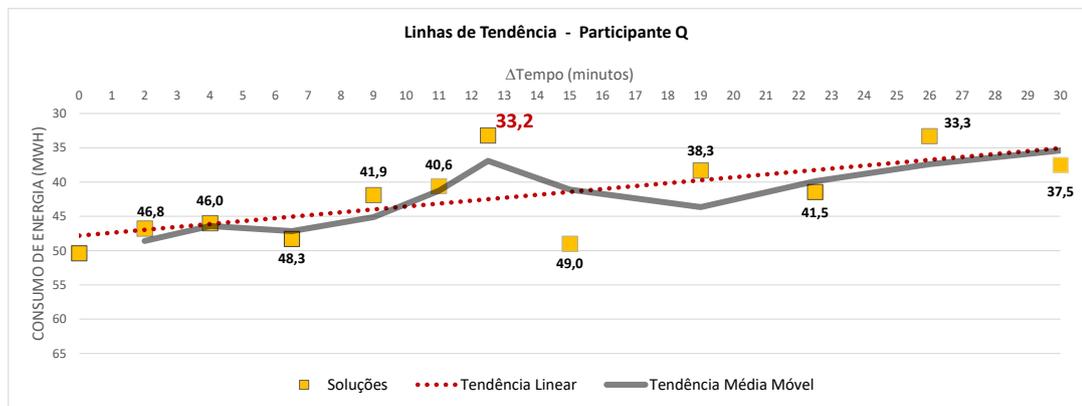
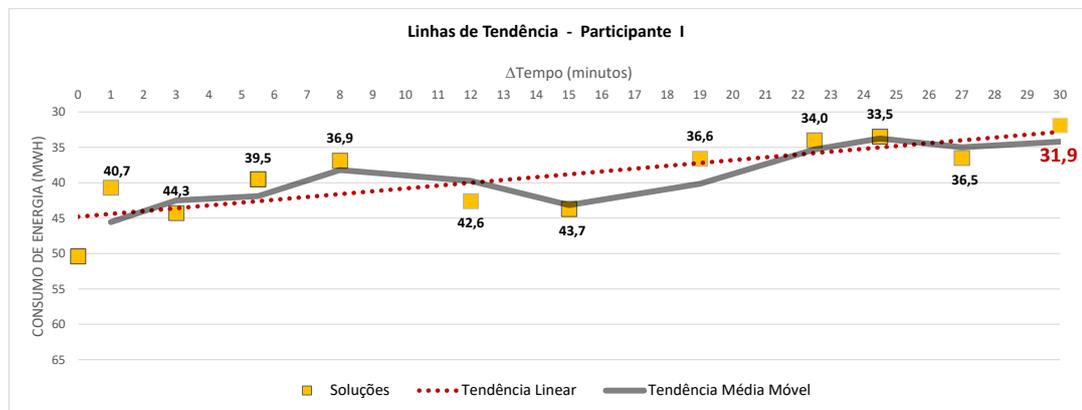
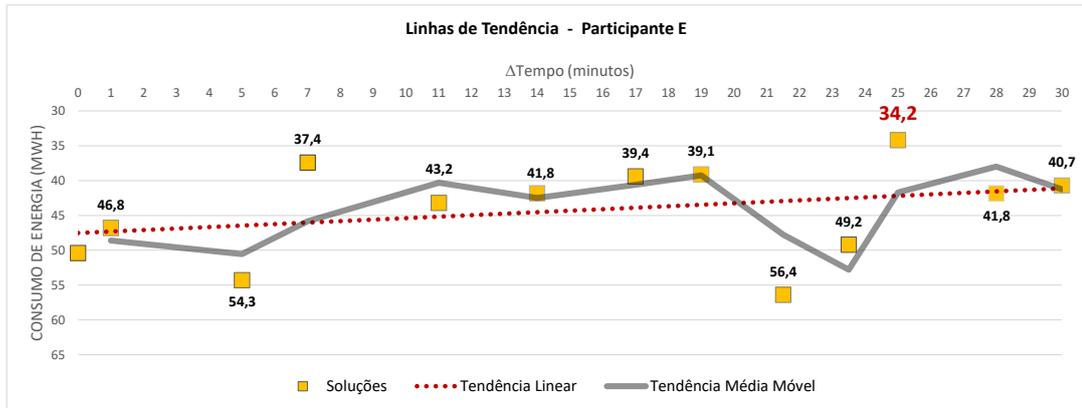
Figura 42 Gráfico correlacionando consumo de energia (MWh) e tempo (minutos) entre cada simulação do participante 'T'

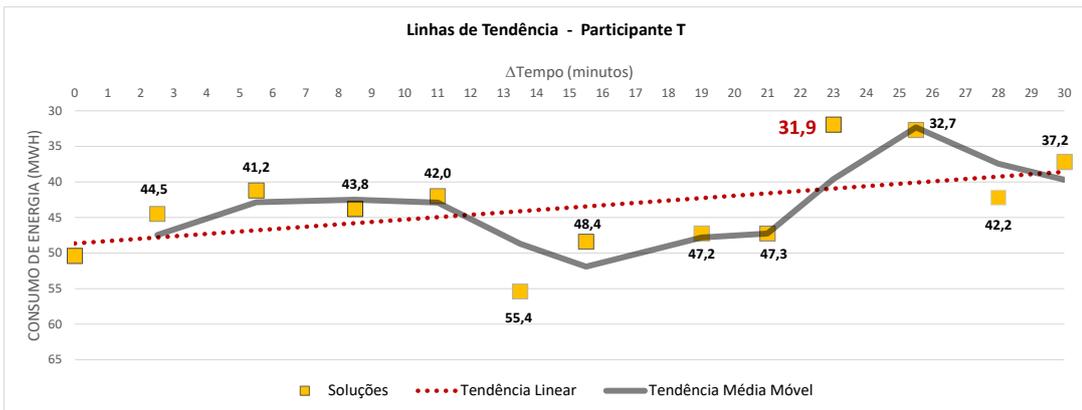
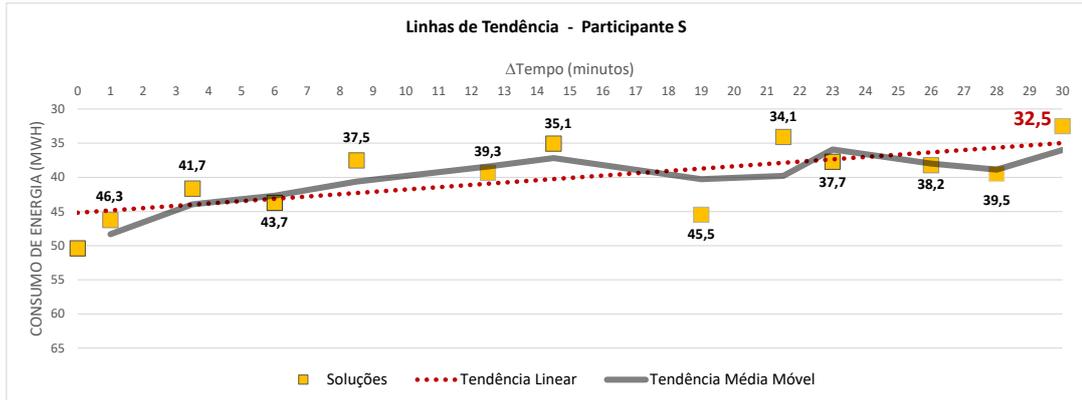


Fonte: elaborado pela autora.

O apêndice F ilustra graficamente, através do terceiro e quarto gráfico, descritos para cada participante, a relação entre tempo e desempenho, traçando uma linha de tendência. As linhas de tendência linear e média móvel demonstram a relação entre o tempo decorrido e a evolução das decisões adotadas, buscando relatar o quanto guiado foi o processo projetual dos participantes. Os participantes 'E', 'I', 'Q', 'R', 'S' e 'T' obtiveram os resultados mais expressivos quanto à minimização do consumo de energia. Ao analisar os respectivos gráficos de representação da linha de tendência, pode-se observar como o desempenho das soluções varia ao longo do processo de projeto (Figura 43).

Figura 43 Gráfico com Curvas de Tendência dos seis participantes com maior grau de minimização do consumo de energia





Fonte: elaborado pela autora.

Conforme evidenciado na fundamentação teórica, as decisões de projeto envolvem ações complexas e, muitas vezes conflitantes, em que a experimentação faz parte do processo. As decisões de projeto e aferição levam a novas decisões, através de um processo de análise, descobertas, experimentações e testes, em que algumas estratégias são mais eficientes quando comparadas com outras. Ao analisar a sequência das estratégias de projeto é possível identificar a oscilação dos resultados de desempenho, evidenciando a complexidade e a ausência de linearidade do processo de projeto.

Analisando a oscilação das estratégias de projeto e respectivos resultados de desempenho, pode-se observar o grau de direcionamento a partir do uso do ambiente de aprendizagem sobre o processo de aprendizagem. Mesmo que tenha ocorrido oscilação nos resultados, a tendência linear revelou o avanço gradativo das soluções mais eficientes (Figura 43). Ao avaliar a tendência linear dos participantes ‘E’, ‘I’, ‘Q’, ‘R’, ‘S’ e ‘T’ é possível observar a evolução do processo de tomada de decisões, mesmo com oscilações entre uma simulação e outra. As oscilações estão

evidenciadas pelo traçado da tendência média móvel, retratando que o processo projetual é guiado, em parte, pelo conhecimento empírico, mesmo que auxiliado pelo ambiente de projeto proposto por esse trabalho. A projeção linear e média móvel demonstram a influência que a ferramenta de auxílio a tomada de decisões exerce sobre a curva de aprendizagem da amostra. Quando os dados estatísticos apresentam uma média móvel crescente assume-se a influência positiva que o PASA exerce na aprendizagem.

A projeção da curva de tendência linear e média móvel, traçadas através das soluções geradas pela amostra (Apêndice F), indica que 90% dos graduandos utilizou o PASA para auxiliar a tomada de decisões. O traçado crescente da curva de tendência representa o processo de aprendizagem da amostra e a apropriação da ferramenta como auxílio ao processo de projeto. O traçado decrescente das linhas de tendência é apresentado, apenas, pelos participantes 'A' e 'G'. O participante 'M' expressa à linha de tendência minimamente crescente, aproximando-se de uma faixa constante, enquanto os demais alunos demonstraram a incorporação do conhecimento (Apêndice F). As ações de projeto gravadas no percurso das estratégias adotadas permite configurar o processo de aprendizagem e identificar as alterações que impactaram na minimização do consumo de energia.

3.1.4 Ações de projeto

Visando identificar ações que impactaram na minimização do consumo de energia para aquecimento e refrigeração do ambiente edificado, foram analisadas as ações projetuais ou decisões adotadas pelos usuários durante o experimento. A análise do processo de tomada de decisões resultou em um conjunto de gráficos e tabelas, descritos no Apêndice F e no Apêndice G.

Ao longo do exercício projetual, os alunos testaram estratégias para minimizar o consumo de energia, explorando a posição dos prismas em relação ao plano 'xy' e 'yz' e alterando a proporção das aberturas conforme a orientação das fachadas, através das transformações geométricas, rotação, translação e escala. A descrição das ações projetuais foi estruturada em duas etapas. Primeiro, avaliou-se a relação

entre desempenho e manipulação da forma, e posteriormente, avalia-se a relação entre proporção de aberturas e desempenho. A relação entre desempenho e manipulação da forma avaliou a sequência e recorrência das transformações geométricas, realizando um mapeamento das ações de projeto; a relação entre desempenho e proporção de aberturas orientou a avaliação da sequência, recorrência e porcentagem das alterações propostas para as fenestraçãoes.

3.1.5 Desempenho x manipulação da forma

Visando identificar impactos que a manipulação da forma poderia exercer sobre o processo de aprendizagem, as ações projetuais da amostra foram sistematizadas. O mapeamento das ações de projeto consistiu na aferição quantitativa e sequencial das alterações geométricas envolvendo rotação, translação e escala aplicadas durante o processo de manipulação do modelo físico. A sistematização dos procedimentos obedeceu mapeamento das ações individualizadas da amostra, identificando a sequência, recorrência e impacto que essas ações geraram durante o processo de tomada de decisões. O mapeamento das ações de projeto encontra-se no Apêndice G.

Observou-se predominância de rotação e translação dos volumes, precedendo a alteração (escala) das aberturas. O uso recorrente das três transformações geométricas, rotação, translação e escala numa sequência projetual, caracteriza o uso do PASA como plataforma de exploração, visualização e representação de ideias. Alguns participantes utilizaram a ferramenta com maior linearidade, explorando uma quantidade menor de transformações geométricas em cada sequência e demonstrando assim, objetividade e clareza projetual.

A sequência projetual, no intervalo de tempo estabelecido, entre uma simulação e outra, foi descrita pelas possíveis ações de projeto abaixo relacionadas:

- Translação
- Rotação no plano 'xy'
- Aumento da fachada Norte
- Aumento da fachada Sul
- Rotação no plano 'yz'
- Redução da fachada Norte
- Redução da fachada Sul

- Aumento da fachada Leste
- Aumento da fachada Oeste
- Redução da fachada Leste
- Redução da fachada Oeste

A análise da manipulação dos dois participantes que obtiveram o menor consumo de energia – participante ‘I’ e participante ‘T’ – mostra a diferença de percurso adotado por ambos, mesmo que a solução encontrada, para a minimização do consumo, seja a mesma (Tabela 5).

Tabela 5 Mapeamento das transformações geométricas e resultados de desempenho obtidos em sequência cronológica pelo participante ‘I’ e ‘T’

Mapa de Procedimentos - Participante I		
Sequência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1	↔ ↻ ↔ ↻ ↔ ●	40,7
2	■ ●	44,3
3	↻ ●	39,5
4	↔	36,9
5	↔ ↻ ↔ ● ■	42,6
6	↔ ● ■	43,7
7	↻ ↔ ● ■	36,6
8	●	34,0
9	●	33,5
10	■	36,5
11	●	31,9

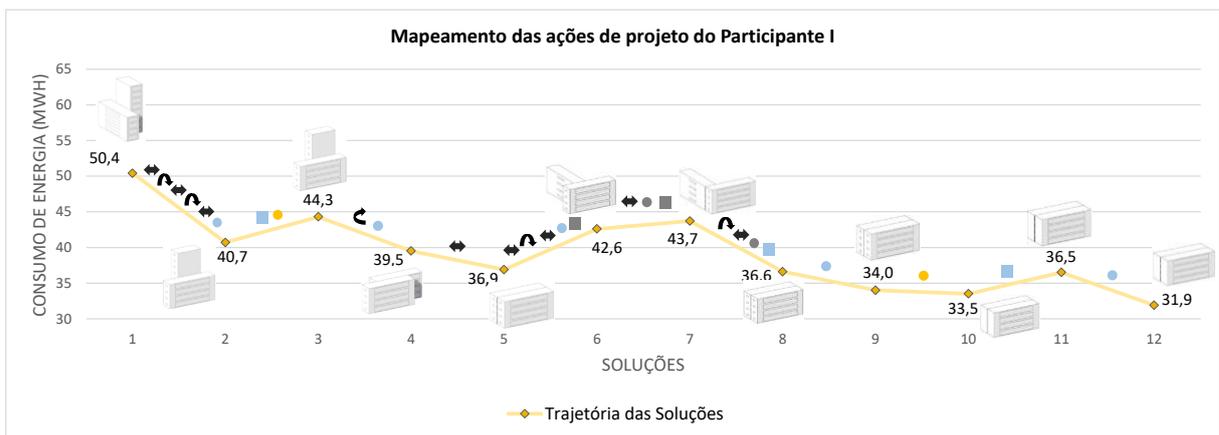
Mapa de Procedimentos - Participante T		
Sequência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1	↻ ↔ ● ■ ●	44,5
2	● ■	41,2
3	↻ ↔ ■ ●	43,8
4	↔ ↔ ● ■	42,0
5	↻ ■ ● ■	55,4
6	↻ ↔	48,4
7	↻ ↔ ↻ ↔ ■ ● ● ↔	47,2
8	↔	47,3
9	↻ ↻ ↔ ● ●	31,9
10	↻ ↻ ↻ ↔ ↻ ↻ ↔ ↔	32,7
11	● ■ ■	42,2
12	■ ● ●	37,2

Legenda	
Translação	↔
Rotação Eixo 'xy'	↻
Rotação Eixo 'yz'	↻
Aumento F.Norte	■
Redução F.Norte	●
Aumento F.Sul	■
Redução F.Sul	●
Aumento F.Leste	■
Redução F.Leste	●
Aumento F.Oeste	■
Redução F.Oeste	●

Fonte: elaborado pela autora.

O mapeamento das ações de projeto adotadas pelo participante 'I' (Tabela 5) relata quatro sequências projetuais com mais de duas transformações geométricas. As demais manipulações realizadas utilizaram no máximo dois parâmetros para gerar uma nova simulação. Nas últimas quatro simulações, o participante alterou apenas a proporção das aberturas, mantendo a estratégia compositiva dos volumes. As duas volumetrias geradas após a forma inicial, exploraram a relação entre as fachadas leste e oeste, mantendo a geometria semelhante à forma inicial. O processo de projeto do participante 'I' é descrito conforme os resultados da tabela e gráfico, exibidos respectivamente pela Tabela 5 e Figura 44.

Figura 44 Mapeamento das transformações geométricas e resultados de desempenho e geometria obtidos em sequência cronológica pelo participante 'I'



Fonte: elaborado pela autora.

No primeiro período de manipulação, o participante 'I' explorou rotações e translações, mas manteve um volume horizontal e outro vertical, assim como a forma inicial, e antes de simular a geometria, buscou reduzir a proporção da abertura leste. Após verificar que a estratégia simulada reduziu praticamente 10.000 kWh, o aluno ampliou a abertura da fachada leste e reduziu a fenestração oeste. Constatado o aumento do consumo ao ampliar a fenestração da fachada leste, reduziu a fachada leste e, através da rotação do prisma vertical, manteve os dois prismas na posição horizontal. Transladando um dos prismas, a simulação subsequente alcançou uma solução compacta dos volumes e manteve a mesma proporção de aberturas da solução testada anteriormente. Manipulando um dos volumes através de translações e rotação no plano cartesiano 'xy', reduzindo

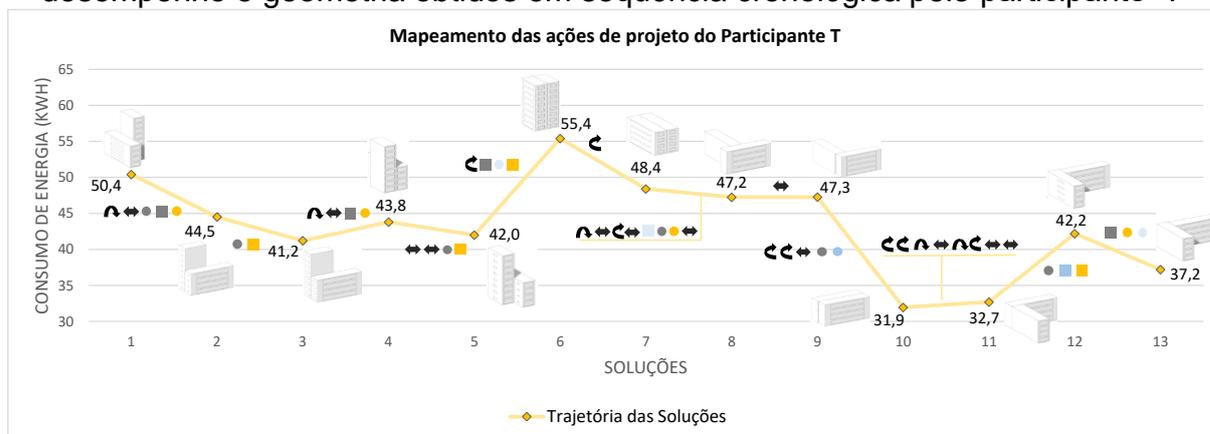
novamente a abertura leste e ampliando a proporção de aberturas orientadas ao norte, o aluno verificou o aumento do consumo da energia. Ao manipular novamente a forma, o volume orientado sentido leste/oeste foi trasladado e a abertura norte foi reduzida. Antes mesmo de executar a simulação o aluno retornou a proporção anterior da fachada norte; simulando então, a mesma proporção de abertura, porém com uma geometria em 'L'.

Ao manipular pela sétima vez o modelo, o participante 'I' rotacionou e trasladou a forma, mantendo os dois prismas no plano horizontal, compactos como um volume elementar, reduziu a proporção de aberturas na fachada leste e ampliou na fachada oeste. Após verificar que a forma gerada foi a mais eficiente dentre as anteriores, o aluno manteve a volumetria dos prismas até o final do exercício. Nas simulações seguintes, reduziu-se a proporção de aberturas orientadas a oeste, e os planos translúcidos da fachada leste são aumentados e reduzidos.

O participante 'I' realizou sequências breves e diretas ao longo do processo de manipulação da forma, enquanto o participante 'T', que obteve a mesma solução final de minimização do consumo, manipulou e utilizou com mais frequência as transformações geométricas. O modelo físico utilizado para a manipulação dos prismas e alteração das fenestraçãoes é utilizado pela maior parte da amostra de maneira similar ao participante 'T', explorando a alteração de três a cinco variáveis em média entre cada simulação. No total, o participante 'I' teve 27 variáveis computadas pelo mapeamento das ações de projeto, enquanto o participante 'T' obteve uma sequência de 49 variáveis.

A média de ações executadas pelo conjunto dos estudantes durante o processo de manipulação foi 37 com a quantidade de ações não se correlacionando com os dados de desempenho. O participante 'T' explorou a forma, em seu primeiro contato com o modelo físico, através de uma sequência de cinco variáveis (Figura 45). Primeiro rotacionou um dos prismas, seguido da translação do mesmo e da manipulação das fachadas norte e oeste. Em três momentos do processo de projeto, o participante alterou a forma e manteve a proporção das aberturas e em outros dois momentos, manteve-se a geometria e alteraram-se as proporções de abertura (Figura 45).

Figura 45 Mapeamento das transformações geométricas e resultados de desempenho e geometria obtidos em sequência cronológica pelo participante 'T'



Fonte: elaborado pela autora.

O mapeamento das transformações geométricas e sua sequência, correlacionando o número de transformações geométricas e os resultados de desempenho energético, demonstram que os indivíduos que alcançaram as soluções mais otimizadas, estabeleceram padrões de alteração da forma. Ao analisar o mapeamento das ações dos seis indivíduos com os resultados mais expressivos para minimização do consumo, 'I', 'T', 'S', 'Q', 'R' e 'E', identifica-se uma lógica no processo de tomada de decisões: o aluno passou a utilizar a simulação para verificar o que o aumento ou redução das aberturas determinou no desempenho da forma; ou então, qual o impacto que a posição de um volume em relação a outro pode exercer na performance final. Ao estabelecer, numa operação, apenas a alteração de uma propriedade – proporção de aberturas ou volumetria – o aluno passou a compreender as implicações que a manipulação das variáveis exerce sobre o desempenho. Ao alterar a volumetria e a proporção de aberturas, os usuários que encontraram melhor desempenho identificaram que a forma elementar e a redução das aberturas proporcionava a minimização do consumo de energia, considerando as restrições e variáveis do exercício proposto.

Os participantes 'A', 'D', 'F', 'L' e 'M' alteraram a forma do envoltório em todos os intervalos simulados, ou seja, 24% da amostra nunca manteve a mesma geometria entre uma simulação e outra. O restante da amostra manteve, ao menos uma vez, a geometria, alterando apenas as fenestraçãoes e avaliando o impacto de alterar apenas a forma, sem manipular a proporção de aberturas. O participante 'B', manteve a posição dos prismas quatro vezes, mas sempre alterou a proporção das

aberturas. Os demais alunos sempre mantiveram, em um momento ou mais, a alteração de apenas uma variável – forma ou fenestrações. Mantendo as aberturas e alterando a forma do envoltório, os usuários visualizaram o impacto da forma sobre o desempenho. Nenhum dos participantes manteve, durante todo o processo, uma das variáveis fixa. Em algumas situações, alteraram-se ambas as variáveis, porém de modo sistemático, mantendo uma lógica entre manipulação e a busca pelas soluções minimizando o consumo de energia.

A sequência determinada por uma ou outra transformação geométrica – rotação, translação, escala – não comprometeu o desempenho da forma gerada. Mas foi possível observar que tanto a alteração da forma do envoltório quanto à proporção das fenestrações, têm impacto sobre o desempenho do projeto. Visando avaliar a relação entre a aberturas e desempenho, o item subsequente, analisa os impactos estabelecidos durante o processo de tomada de decisões.

3.1.6 Desempenho x proporção de aberturas

Para identificar o impacto que a proporção das fenestrações tem sobre a minimização do consumo de energia, procedeu-se a análise das manipulações de aberturas após cada simulação. Esta análise encontra-se no Apêndice F.

Ao analisar a manipulação das aberturas constatou-se que a proporção das fenestrações, assim como a alteração da forma dos volumes, exerceu impacto direto no consumo de energia para aquecimento e refrigeração do ambiente interno. Para alcançar menor consumo de energia, os estudantes tiveram que alterar as fenestrações, sem deixar de considerar, empiricamente, aspectos arquitetônicos como a permeabilidade visual, iluminação e ventilação natural, proporção, entre outros. Estes fatores contribuíram para que as aberturas sofressem aumentos e reduções para equalizar o resultado energético e os aspectos inerentes ao projeto arquitetônico.

Os participantes 'I' e 'T' destacaram-se por alcançarem o menor consumo de energia. A proporção das fenestrações destas soluções utilizou a fachada oeste oclusa, as fachadas norte e leste com 25% de abertura e a fachada sul promovendo

75% de abertura. O terceiro melhor desempenho consome 32,5 MWh de energia anualmente (participante 'S'), e usa a mesma geometria, mas considera 25% de abertura na fachada oeste, diferentemente das duas soluções anteriores. Enquanto, as soluções apresentadas pelos participantes 'Q', 'R' e 'E', evidenciam soluções geométricas distintas, alterando a maior proporção de fachada nas orientações norte, oeste e sul (Tabela 6), mantendo resultados similares.

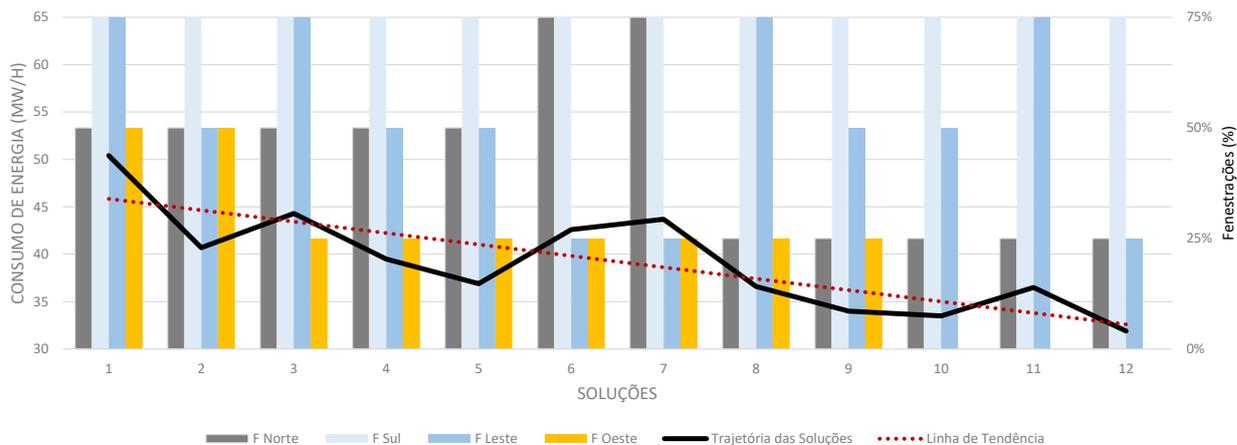
Tabela 6 Tabela com a sequência de manipulações da forma, proporção das aberturas e resultados de desempenho dos participante 'I', 'T', 'S', 'Q', 'R' e 'E'

Participantes	I	T	S	Q	R	E
Fenestração	F Norte	25%	25%	25%	75%	25%
	F Sul	75%	75%	75%	25%	75%
	F Leste	25%	25%	25%	25%	25%
	F Oeste	0%	0%	25%	75%	25%
Geometria (pers sudoeste)						
Desempenho CE (MWh)	31,9 MWh	31,9 MWh	32,5 MWh	33,2 MWh	33,6 MWh	34,2 MWh

Fonte: elaborado pela autora.

Os resultados gerais apresentados pela amostra (Apêndice H) demonstram que as soluções que proporcionam menor consumo de energia mantêm, no mínimo, duas fachadas com 25% de planos translúcidos. Como o exercício estabeleceu que, pelo menos, uma fachada devesse ter 75% de abertura, as soluções consideraram essa restrição, e reduziram, consideravelmente, os demais planos de fachada. O participante 'I' manteve a fachada sul sem variações ao longo do exercício, variando apenas a proporção das fachadas leste, oeste e norte (Figura 46).

Figura 46 Histograma correlacionando consumo de energia e porcentagem das fenestrações adotada pelo participante 'I'



Fonte: elaborado pela autora.

Após a oitava simulação, o participante 'I' manteve a geometria dos prismas e alterou apenas a proporção das aberturas. Inicialmente testou duas fachadas, leste e sul, com 75% de aberturas e as demais com 25%. Em seguida, reduziu a fachada leste para 50%, observando que o consumo de energia reduziu 2.600 kWh. Na terceira alteração, manteve a proporção das fachadas norte, sul e leste, e anulou as aberturas a oeste, reduzindo 500 kWh. Antes da última simulação, o usuário ampliou o máximo possível a fachada leste e manteve as demais conforme anteriormente, resultando em desempenho e proporção de aberturas similar a 8ª simulação realizada. Por fim, reduziu as aberturas da fachada leste, mantendo norte e leste com 25%, oeste vedado e manteve a fachada sul com 75%, obtendo resultado final de 31,9 MWh (Tabela 7).

Tabela 7 Tabela com a sequência de manipulações da forma, proporção das aberturas, tempo e resultados de desempenho do participante 'I'

PARÂMETROS	SOLUÇÕES						
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°
Tempo (min.)	0	1,00	3,00	5,50	8,00	12,00	15,00
Fenestraçãoes	F Norte	50%	50%	50%	50%	75%	75%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F Leste	75%	50%	75%	50%	50%	25%
	F Oeste	50%	50%	25%	25%	25%	25%
Geometria (pers sudoeste)							
Desempenho (MW/h)	50,4	40,7	44,3	39,5	36,9	42,6	43,7

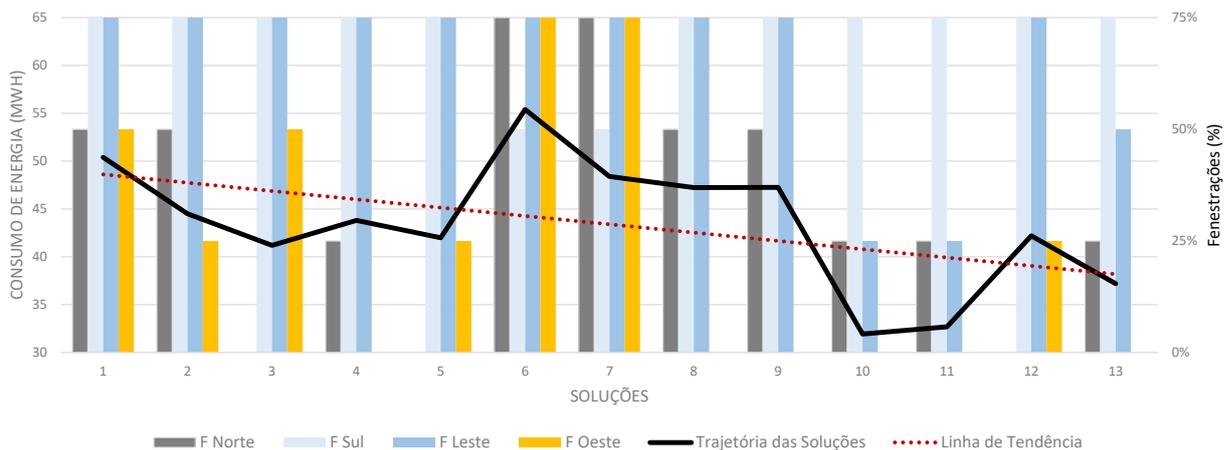
PARÂMETROS	SOLUÇÕES					
	8°	9°	10°	11°	12°	
Tempo (min.)	19,00	22,50	24,50	27,00	30,00	
Fenestraçãoes	F Norte	25%	25%	25%	25%	25%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%
	F Leste	75%	50%	50%	75%	25%
	F Oeste	25%	25%	0%	0%	0%
Geometria (pers sudoeste)						
Desempenho (MW/h)	36,6	34,0	33,5	36,5	31,9	

Fonte: elaborado pela autora.

Os participantes 'I' e 'T' obtiveram o mesmo resultado de minimização com sequência de decisões distintas. O participante 'T' explorou a redução e aumento de todos os planos de fachada, incluindo a verificação do impacto da oclusão das fachadas norte e oeste (Figura 47). Nas primeiras quatro simulações, explorou o aumento e redução das fachadas norte e oeste, reduziu a fachada sul e testou a forma vertical elementar, constatando que o desempenho dos prismas verticais, com 50% de fenestraçãoes na fachada sul e as demais com 75%, possui maior consumo que a forma inicial. A partir desta constatação, o usuário conservou a proporção de aberturas e alterou a forma, propondo os dois prismas em posição horizontal e manteve a geometria elementar, reduzindo 7.000 kWh no consumo de energia anual. Posteriormente, inverteu a proporção das fachadas norte e sul, eliminou as

aberturas da fachada oeste e alterou a forma dos prismas para chegar a conclusão de que o consumo foi reduzido.

Figura 47 Histograma correlacionando consumo de energia e porcentagem das fenestrações adotada pelo participante 'T'



Fonte: elaborado pela autora.

Ao executar a translação de apenas um dos volumes – entre 4^a e 5^a simulação e 8^a e 9^a simulação – o participante T identificou a redução do consumo de energia com variação mínima da performance. Em outro momento, o aluno reduziu as fenestrações das fachadas leste e norte estabelecendo apenas 25% de aberturas, manteve a fachada sul com 75% e a fachada oeste sem aberturas, obtendo assim a forma com menor consumo (Tabela 8). Nas três últimas simulações, o aluno manipulou as aberturas norte, leste e oeste, gerando um partido em 'L', que, por fim, apresentou como proposta final do exercício. Ao variar individualmente a forma, mantendo as fenestrações e, em outros momentos, variando apenas a proporção das fenestrações e mantendo a forma inalterada, o aluno deixou claro suas estratégias; ao mesmo tempo em que explorou ampla diversidade de alternativas.

Tabela 8 Tabela com a sequência de manipulações da forma, proporção das aberturas, tempo e resultados de desempenho do Participante ‘T’

Participante T 22anos 7ºsemestre

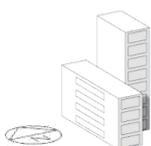
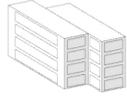
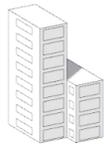
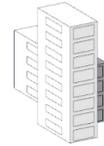
PARÂMETROS		SOLUÇÕES							
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
Tempo (min.)		0	2,5	5,5	8,5	11,0	13,5	15,5	19,0
Fenestrações	F Norte	50%	50%	0%	25%	0%	75%	75%	50%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	50%	50%	75%
	F Leste	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F Oeste	50%	25%	50%	0%	25%	75%	75%	0%
Geometria (pers sudoeste)									
Desempenho (MWh)		50,4	44,5	41,2	43,8	42,0	55,4	48,4	47,2

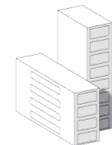
PARAMETROS		9°	10°	11°	12°	13°
Tempo (min.)		21,0	23,0	25,5	28,0	30,0
Fenestrações	F Norte	50%	25%	25%	0%	25%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%
	F Leste	75%	25%	25%	75%	50%
	F Oeste	0%	0%	0%	25%	0%
Geometria (pers sudoeste)						
Desempenho (MWh)		47,3	31,9	32,7	42,2	37,2

Fonte: elaborado pela autora.

Ao analisar individualmente a amostra, observa-se que os participantes ‘A’ e ‘B’ alteraram a proporção das aberturas em todos os intervalos simulados, enquanto, o restante da amostra manteve a proporção das aberturas em algumas situações, alterando apenas a volumetria do envoltório, e vice-versa. O participante U, a partir da sexta geração, não altera as fenestrações e mantém a proporção das fachadas norte, sul, leste e oeste com, respectivamente, 25%, 75%, 50% e 50%. Não gerou soluções com planos de fachada sem aberturas, e nem mesmo buscou reduzir a proporção das fenestrações sul. Entre uma simulação e outra, apenas três vezes alterou as proporções das aberturas. Na primeira ocasião, alteraram-se as fachadas leste e oeste, em seguida norte e oeste e por fim, reduziu-se a fachada norte.

Tabela 9 Tabela com a sequência de manipulações da forma, proporção das aberturas, tempo e resultados de desempenho do Participante 'U'

PARÂMETROS	SOLUÇÕES						
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°
Tempo (min.)	0,0	3,0	7,0	10,0	14,0	16,0	18,5
Fenestraçãoes	F. Norte	50%	50%	50%	75%	75%	25%
	F. Sull	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F. Leste	75%	50%	50%	50%	50%	50%
	F. Oeste	50%	75%	75%	50%	50%	50%
Geometria (persp. sudoeste)							
Desempenho (MW/h)	50,4	48,7	46,1	42,1	46,5	41,7	45,1

PARÂMETROS					
Tempo (min.)		8°	9°	10°	11°
Fenestraçãoes	F Norte	23,0	26,0	28,0	30,0
	F Sul	25%	25%	25%	25%
	F Leste	75%	75%	75%	75%
	F Oeste	50%	50%	50%	50%
Geometria (pers sudoeste)					
Desempenho (MWh)		38,6	41,5	37,0	40,9

Fonte: elaborado pela autora.

Observa-se que ao longo do processo de projeto, o participante 'U' reduziu as fenestraçãoes para uma fachada com 25%, dois planos com 50% e um com 75% de aberturas. Em nenhum momento, cogitou o possível impacto da anulação⁴¹ de uma das fachadas, assim como sempre manteve três fachada com, no mínimo, 75% ou 50% de planos translúcidos (Tabela 9). Pode-se observar que 62% da amostra explorou a possibilidade de retirar totalmente as fenestraçãoes em uma das fachadas, 33% dos usuários mantiveram no mínimo três fachadas com 50 e 75% com fenestraçãoes e os demais exploraram outras possibilidades, reduzindo mais de um plano a 25%, conforme se pode observar no Apêndice F.

⁴¹ A anulação da fachada significa não ter aberturas, ou seja, uma fachada cega.

A análise individual dos alunos, ilustrada no Apêndice F e H, relata as ações de projeto correlacionando a manipulação das fenestrações, exploração da geometria do envoltório e desempenho. De modo geral, a análise apresenta como os alunos utilizaram a ferramenta de aprendizagem (PASA), utilizando-a como um ambiente de auxílio a exploração da forma e tomada de decisões, tomando consciência das suas ações e reduzindo o processo de tentativa e erro. Além de estar diretamente relacionada com o processo de projeto e tomada de decisões, a análise permitiu que fossem identificados os fatores que impactam na minimização do consumo energético.

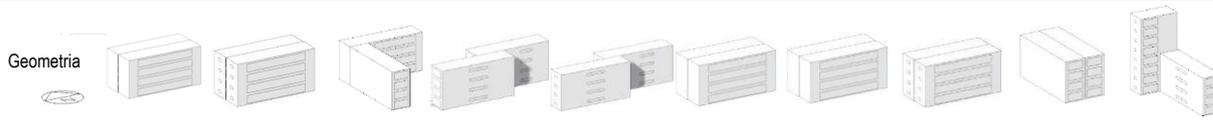
3.1.7 Fatores que impactam na minimização do consumo de energia

Através da análise do processo de projeto e tomada de decisões foi possível identificar os fatores que impactaram na minimização do consumo de energia para aquecimento e refrigeração do ambiente interno comercial. Os fatores identificados retratam o impacto específico que o exercício proposto pela tese trata – uma edificação comercial composta por dois prismas, zona única e materiais de vedação com baixa transmitância térmica. A relação abaixo descreve as principais alterações morfológicas resultantes do processo de minimização do consumo de energia percorrido pela amostra.

- (1) **Compactação da volumetria.** Ao analisar e comparar 201 soluções, geradas pela amostra, pode-se identificar que volumetrias elementares apresentam um consumo reduzido de energia para aquecer e resfriar o ambiente com auxílio de condicionamento do ar (Tabela 10 e Apêndice I).

Tabela 10 Tabela com as dez soluções que apresentaram menor consumo de energia entre o total de simulações realizadas ao longo do experimento pelos vinte e um graduandos

Parâmetros	Participantes									
	I e T	S	T	Q	Q	I	R	I	S	E
F Norte	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	50%	25%
F Sul	75%	75%	75%	25%	25%	75%	75%	75%	75%	75%
F Leste	25%	25%	25%	25%	75%	50%	75%	50%	50%	25%
F Oeste	0%	25%	0%	75%	25%	0%	0%	25%	0%	25%

Geometria										
Desempenho (MWh)	31,9	32,5	32,7	33,2	33,3	33,5	33,6	34,0	34,1	34,2

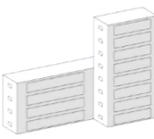
Fonte: elaborado pela autora.

- (2) **Horizontalização.** A análise da amostra identificou a recorrência de configurações volumétricas horizontais quando avaliadas soluções com menor consumo de energia para aquecimento e refrigeração (Tabela 10 e Apêndice I). Ao observar as 10 soluções mais eficientes, geradas pela amostra, verificou-se que nove delas apresentavam os dois prismas na posição horizontal; aumentando o contato do envoltório com o solo e, conseqüentemente, a área de cobertura.
- (3) **Redução dos planos translúcidos.** As soluções com menor consumo de energia apresentaram a redução dos planos translúcidos em relação aos planos opacos de fachada (Tabela 10). No entanto, outros fatores correlacionaram-se com esse aspecto, como a configuração da forma do envoltório e localização dos planos translúcidos.
- (4) **Configuração da volumetria do envoltório.** Analisando a Tabela 11, observa-se como a geometria do envoltório impactou no consumo de energia, confirmando a influência que a volumetria horizontalizada e compacta exerce sobre o desempenho. Ao relacionar um conjunto de configurações geométricas com a mesma proporção de aberturas foi possível constatar a relação entre o desempenho e a configuração volumétrica do envoltório. Assim como há desempenhos distintos conforme a configuração da geometria com mesma proporção de aberturas, também foi possível observar formas distintas com a mesma proporção e planos translúcidos e com a mesma performance, como o caso da segunda e terceira geometria da Tabela 11. As formas com mesma

proporção de planos translúcidos e mesmo desempenho energético reafirmam que fatores como a compactação da forma demonstram maior eficiência, mas evidenciam como pode-se manter graus de redução do consumo, explorando a variabilidade formal do partido arquitetônico.

Tabela 11 Tabela com soluções que apresentaram a mesma proporção de planos translúcidos e configurações geométricas distintas

Parâmetros		Participantes						
		S	He l	C	I	K	M	S
Fenestraçãoes	F Norte	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F Leste	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
	F Oeste	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
Geometria								
Desempenho (MWh)		34,1	36,9	36,9	39,5	38,7	40,6	41,7

Parâmetros		Participantes					
		G	M	M	M	A	H
Fenestraçãoes	F Norte	50%	50%	50%	50%	50%	50%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F Leste	50%	50%	50%	50%	50%	50%
	F Oeste	25%	25%	25%	25%	25%	25%
Geometria							
Desempenho (MWh)		42,7	43,5	44,6	45,3	45,4	46,7

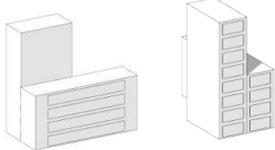
Fonte: elaborado pela autora.

- (5) **Orientação da geometria.** Comparando duas soluções com mesma configuração geométrica, proporção de planos translúcidos idênticos e orientações distintas (Tabela 12), observou-se como o desempenho difere-se. Quando os planos em maior proporção são orientados no sentido norte/sul, identificou-se a redução do consumo de energia. Como as fenestraçãoes são uma relação proporcional com a área total do plano de fachada, ao ampliar os planos de fachada norte e sul ampliou-se, também, a proporção de superfícies

translúcidas e, conseqüentemente, a área translúcida nas fachadas leste/ oeste são comprimidas. Como a relação das superfícies translúcidas é proporcional ao plano de fachada, outros fatores como a proporção das fenestraçãoes em distintas orientações, podem influenciar no desempenho da solução projetual, conforme descrito na sequência.

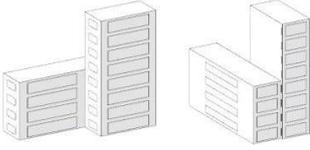
Tabela 12 Tabela com soluções que apresentaram a mesma proporção de planos translúcidos e configurações geométricas distintas

Parâmetros		Participante	
		N	T
Fenestraçãoes	F Norte	25%	25%
	F Sul	75%	75%
	F Leste	75%	75%
	F Oeste	0%	0%

Geometria	
	

Desempenho (MWh)	
	40,1
	43,8

Parâmetros		Participante	
		J	J
Fenestraçãoes	F Norte	25%	25%
	F Sul	75%	75%
	F Leste	75%	75%
	F Oeste	50%	50%

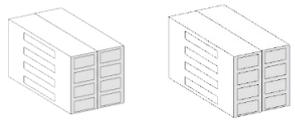
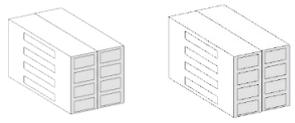
Geometria	
	

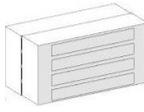
Desempenho (MWh)	
	45,0
	49,9

Fonte: elaborado pela autora.

- (6) **Relação entre a proporção dos planos translúcidos.** Um procedimento frequente foi a avaliação do impacto que a proporção das aberturas exercia. Mantendo a geometria inalterada e aumentando ou reduzindo apenas um dos planos translúcidos, eram avaliados os impactos que cada plano de fachada teriam em relação ao consumo de energia para aquecer e resfriar. As tabelas 13, 14, 15 e 16 apontam, respectivamente, o impacto das fachadas norte, sul, leste e oeste.

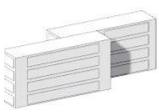
Tabela 13 Tabela com soluções que apresentaram volumetrias iguais e alteram apenas a proporção do plano translúcido Norte

Parâmetros	Participante		
	C	C	
Fenestrações	F Norte	25%	0%
	F Sul	75%	75%
	F Leste	50%	50%
	F Oeste	50%	50%
Geometria			
Desempenho (MWh)	36,9	36,5	

Parâmetros	Participante		
	P	I	
Fenestrações	F Norte	50%	25%
	F Sul	75%	75%
	F Leste	75%	75%
	F Oeste	0%	0%
Geometria			
Desempenho (MWh)	38,9	36,5	

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 14 Tabela com soluções que apresentaram volumetrias iguais e alteram apenas a proporção do plano translúcido Sul

Parâmetros	Participante		
	Q	Q	
Fenestrações	F Norte	25%	25%
	F Sul	75%	25%
	F Leste	25%	25%
	F Oeste	75%	75%
Geometria			
Desempenho (MWh)	40,6	33,2	

Parâmetros	Participante		
	H	M	
Fenestrações	F Norte	50%	50%
	F Sul	75%	50%
	F Leste	75%	75%
	F Oeste	25%	25%
Geometria			
Desempenho (MWh)	46,4	44,2	

Fonte: elaborado pela autora.

Identificou-se, também, que a redução proporcional do plano translúcido em uma mesma orientação solar poderia variar (Tabela 15). Ao analisar a diminuição de 25% da fachada leste, uma configuração em “L” da geometria apresentou redução inferior do consumo de energia, quando comparada a uma geometria elementar, com a mesma alteração. Mesmo considerando a baixa transmitância térmica dos

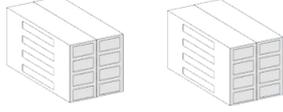
materiais do envoltório, a diferenciação dos resultados ocorreu devido à quantidade total de superfície exposta ao sol e ambiente externo.

Tabela 15 Tabela com soluções que apresentaram volumetrias iguais e alteram apenas a proporção do plano translúcido Leste

Parâmetros	Participante		
	S	S	
Fenestrações	F Norte	50%	50%
	F Sul	75%	75%
	F Leste	75%	50%
	F Oeste	25%	25%

Parâmetros	Participante		
	J	C	
Fenestrações	F Norte	25%	25%
	F Sul	75%	75%
	F Leste	75%	50%
	F Oeste	50%	50%

Geometria		
Desempenho (MWh)	46,3	41,7

Geometria		
Desempenho (MWh)	42,0	36,9

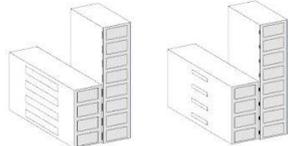
Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 16 Tabela com soluções que apresentaram volumetrias iguais e alteram apenas a proporção do plano translúcido Oeste

Parâmetros	Participante		
	Q	J	
Fenestrações	F Norte	25%	25%
	F Sul	75%	75%
	F Leste	50%	50%
	F Oeste	75%	50%

Parâmetros	Participante		
	J	J	
Fenestrações	F Norte	25%	25%
	F Sul	75%	75%
	F Leste	75%	75%
	F Oeste	50%	25%

Geometria		
Desempenho (MWh)	46,8	41,0

Geometria		
Desempenho (MWh)	49,9	48,0

Fonte: elaborado pela autora.

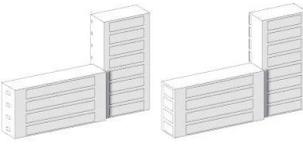
O impacto no desempenho difere-se quanto à orientação dos planos translúcidos, mas em detrimento da forma essa relação é variável. Ou seja,

dependendo da solução geométrica adotada, a redução de um dos planos de fachada é mais expressiva do que outra. A redução de 25% do plano translúcido oeste de duas volumetrias distintas, não implicou em redução proporcional do consumo de energia (Tabela 16). Enquanto o volume elementar verticalizado reduziu 5.800 kWh de energia, a solução composta por um prisma vertical e outro horizontal, diminui apenas 1.900 kWh.

A análise da manipulação das aberturas, também, identificou a diferenciação do impacto da mesma ação em geometrias distintas quando comparada a redução proporcional entre as fachadas leste e oeste. Em configuração volumétrica horizontal o desempenho energético não sofreu alteração quando se inverteu a proporção dos planos translúcidos leste e oeste (Tabela 17). Ao mesmo tempo, a alteração proporcional das fachadas leste e oeste obteve redução do consumo quando ampliada a fachada oeste. Deve ser considerado que a área de influência da fachada leste corresponde ao dobro da fachada oeste.

Tabela 17 Tabela com soluções que apresentaram mesma volumetria e alteram a proporção do plano translúcido Leste e Oeste

Parâmetros	Participantes		
	D	Q	
Fenestraçãoes	F Norte	25%	25%
	F Sul	75%	75%
	F Leste	75%	50%
	F Oeste	50%	75%
Geometria			
Desempenho (MWh)	41,9	41,9	

Parâmetros	Participante		
	O	O	
Fenestraçãoes	F Norte	25%	25%
	F Sul	75%	75%
	F Leste	75%	25%
	F Oeste	25%	75%
Geometria			
Desempenho (MWh)	43,7	42,6	

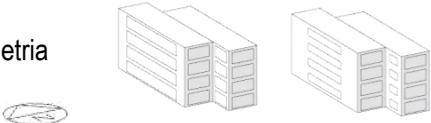
Fonte: elaborado pela autora.

Relacionando o plano translúcido norte a fachada oeste, identifica-se que a redução da fachada oeste, proporcionalmente, ao aumento da fachada norte é mais eficiente, porém em proporções distintas (Tabela 18).

Tabela 18 Tabela com soluções que apresentaram mesma volumetria e alteram a proporção do plano translúcido Norte e Oeste

Parâmetros	Participante	
	Q	Q
F Norte	50%	75%
F Sul	75%	75%
F Leste	50%	50%
F Oeste	75%	50%

Parâmetros	Participantes	
	S	C
F Norte	50%	0%
F Sul	75%	75%
F Leste	50%	50%
F Oeste	0%	50%

Geometria	Desempenho (MWh)	
	46,1	42,1

Geometria	Desempenho (MWh)	
	34,1	36,5

Fonte: elaborado pela autora.

A diversidade de fatores que impactam a minimização do consumo de energia enfatiza a importância que novos métodos de projeto e ambientes de aprendizagem possuem em EIP. A análise quantitativa dos dados coletados durante o experimento é complementada, a seguir, pela avaliação qualitativa das decisões, abordando aspectos capturados de forma limitada pela análise quantitativa.

3.2 Análise Qualitativa

A análise qualitativa do processo de projeto tem como objetivo identificar procedimentos, ações e estratégias que impactam o desempenho das soluções geradas e que não foram capturadas pela análise quantitativa. A análise dos vídeos e gravações foi utilizada para contextualizar ações e resultados, verificando o quanto o ambiente de aprendizagem proposto influenciou o processo de projeto. O resultado dos questionários foi correlacionado com o desempenho das soluções e processo de projeto resultante.

3.2.1 Características da amostra

A aplicação dos dois questionários (item 0) visou à identificação de possíveis relações entre características da amostra (idade, gênero ou tempo de curso de graduação) e se estas características e possíveis relações tiveram influência nos resultados do experimento e desempenho apresentados no exercício de projeto.

Na tabela 19 é apresentada a correlação dos dados do questionário inicial – semestre, idade, gênero e frequência de uso de maquetes físicas em EIP – como o desempenho da solução mais eficiente atingida, individualmente, pelos participantes. A tabela ordenou os participantes em sentido decrescente, conforme o desempenho da solução com menor consumo atingido durante o exercício projetual. Observa-se que o desempenho não possui relação direta com as variáveis: idade, período do curso, gênero ou o uso frequente de modelos físicos nas EIP. Verificou-se que os participantes, mesmo em fases finais do curso de graduação, não conseguiam prever, na partida, uma soluções que atendessem o objetivo lançado pelo experimento. No questionário final, 100% da amostra declarou que o PASA auxiliou a tomada de decisões e poderia ser utilizada durante EIP.

Tabela 19 Tabela correlacionando os dados do questionário inicial e solução minimizada individualmente pela amostra

Ordem	Participantes	Desempenho	Semestre	Idade	Sexo	Maquete física
1	Participante I	31,9	8	23	f	pouco
2	Participante T	31,9	7	22	m	pouco
3	Participante S	32,5	8	29	m	pouco
4	Participante Q	33,2	6	24	m	pouco
5	Participante R	33,6	6	21	f	nunca
6	Participante E	34,2	7	24	m	pouco
7	Participante G	35,2	7	30	m	frequente
8	Participante C	36,5	8	22	m	pouco
9	Participante H	36,6	7	21	f	pouco
10	Participante D	36,8	7	23	f	pouco
11	Participante J	37,1	8	29	m	pouco
12	Participante P	38,3	8	23	m	pouco
13	Participante U	38,6	9	26	m	frequente
14	Participante K	38,7	8	22	f	pouco
15	Participante F	39,0	9	23	f	frequente
16	Participante N	40,1	10	28	m	frequente
17	Participante O	40,2	8	25	m	pouco
18	Participante L	40,5	6	21	m	pouco
19	Participante M	40,6	10	26	m	pouco
20	Participante B	43,6	10	23	f	frequente
21	Participante A	45,4	9	25	f	pouco

Fonte: elaborado pela autora.

A relação entre dados do questionário e performance das soluções, demonstrou que o PASA pode auxiliar a tomada de decisões, independente de gênero, semestre ou idade dos usuário.

A análise do processo de projeto e tomada de decisões não visava a comparação entre os participantes, mas sim apontar consistência de comportamento que conduziram ao aumento ou redução do consumo de energia na atividade de projeto. A ordem alfabética de identidade dos participantes (anônimos) não estabelece categorizações, mas distingue características recorrentes, dificuldades e padrões de usabilidade vinculados com os resultados mais expressivos para o desempenho.

Na análise da amostra resultante do questionário inicial (Tabela 20), a maior presença de alunos com idade entre 21 e 23 anos reflete a média de idade com que os alunos cursam os últimos cinco semestres em cursos de Arquitetura. Destaca-se também que a maior parte da amostra encontra-se entre o sétimo e oitavo semestre. Como a amostra selecionada para o experimento consistiu em alunos a partir do sexto semestre, a análise do terceiro tema do questionário apresenta a baixa frequência que modelos físicos são utilizados em disciplinas do meio para o final do curso de Arquitetura. A amostra foi unânime ao afirmar que o uso de modelos físicos em EIP não é utilizado constantemente. Menos de 25% da amostra relatou utilizar modelos físicos com frequência, 71,5% afirmaram utilizar muito pouco e 4,8% declarou nunca utilizar; contrapondo-se com afirmações descritas na revisão da literatura sobre as contribuições que esses métodos podem exercer durante a concepção do projeto. Quanto ao uso de software, o total da amostra utiliza o *SketchUp* para modelagem gráfica e geométrica. Aproximadamente 30% da amostra relatou o uso exclusivo de *SketchUp* e os demais mencionaram que utilizam um ou mais softwares além do *SketchUp*, manifestando a predominância do software *Archicad* e *Autocad*.

Tabela 20 Porcentagens resultantes do questionário inicial do experimento

1. Idade	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	14,3%	14,3%	23,8%	9,5%	9,5%	9,5%	0,0%	4,8%	4,8%	9,5%

2. Semestre	6°	7°	8°	9°	10°
	14,3%	23,8%	33,3%	14,3%	14,3%

3. Mod. físicos em etapas iniciais	nunca	pouco	frequente	sempre
	4,8%	71,4%	23,8%	0,0%

4. Softwares em etapas iniciais	não	SketchUp	Autocad	Archicad	Revit	Microstat.	Vectorw.	Rhinoc.
	0,0%	100,0%	23,8%	38,1%	4,8%	4,8%	4,8%	9,5%

5. Avaliação do desempenho	não	sim
	57,1%	42,9%

Fonte: elaborado pela autora.

Outro aspecto relevante, presente na Tabela 20, é a frequência com que o desempenho é considerado, através de softwares, nas etapas iniciais. Do total de participantes, 57,1% declararam que não consideram o desempenho durante a

concepção do projeto, e dentre os 42,9% que relataram considerar o desempenho, 2/3 (dois terços) considerou apenas a insolação. Três participantes declararam considerar o desempenho lumínico além da insolação e apenas um participante da amostra declarou considerar a ventilação enquanto modela a forma arquitetônica. Há uma divergência evidente entre os resultados declarados e a prática observada em atelier, tendo em vista que o desempenho é considerado habitualmente, porém sem dados numéricos e simulações. Possivelmente um dos motivos para essa discordância, decorre pelo fato do desempenho não ser avaliado numericamente ou através de fatores explícitos e objetivos. Ou seja, a amostra não considera um modelo matemático de avaliação do desempenho, mas sim, verificações possíveis de serem consideradas em softwares de modelagem geométrica, como a incidência de sol e sombreamento conforme o período desejado em pontos específicos da geometria. A amostra também relatou considerar aspectos empíricos, como a ventilação cruzada, proteção solar das fachadas no solstício de verão e incidência do sol em períodos do inverno.

Ao analisar o questionário final (Tabela 21), avaliou-se a eficiência do PASA. A totalidade da amostra declarou considerar a ferramenta eficiente na busca por soluções de projeto com objetivo de minimizar o consumo de energia para o uso do ar condicionado, afirmando que utilizariam novamente o ambiente para as fases iniciais em trabalhos futuros.

Tabela 21 Porcentagens resultantes do questionário final do experimento

1. Ambiente auxiliou	sim	não									
	100,0%	0,0%									
2. Aspectos positivos	simples fácil	rápido	compa- ração	auxílio decisão	relação lote	desemp.	parâme- tros				
	38,1%	38,1%	9,5%	28,6%	4,8%	23,8%	9,5%				
3. Aspectos a aprimorar	forma	entorno	materiais	tempo proces.	orient. solar	elem. proteção	ilum. natural	gabarito digital	vegetação	manip. digital	vizualiz.
	52,4%	9,5%	4,8%	9,5%	4,8%	4,8%	4,8%	4,8%	4,8%	4,8%	
4. Ferramentas similares	não	sim	design builder	maquete fisica	sketchup	energy plus	ecotect	citizoom	dialux	relux	archicad
	52,4%	47,6%	14,3%	23,8%	23,8%	4,8%	4,8%	4,8%	4,8%	4,8%	4,8%

Fonte: elaborado pela autora.

Ao justificar a possibilidade de utilizar novamente o PASA, 38,1% da amostra avaliou o ambiente como uma ferramenta simples, fácil, eficiente e/ou rápido, 28,6%

considerou um meio de auxílio ao projeto e a tomada de decisões, 23,8% declarou a importância do desempenho e a relevância de sua antecipação. A amostra também destacou ser uma nova maneira de avaliar o desempenho, destacando a possibilidade de identificar os parâmetros que mais influenciam na exploração da forma, como a disposição do lote e orientação solar, assim como a comparação das soluções aferidas com facilidade.

O terceiro tema do questionário final abordou sugestões e demandas identificadas pela amostra. Ampliar as possibilidades de alteração da forma foi o aspecto com maior recorrência. Mais de 50% dos participantes identifica ser pertinente a ampliação dos limites de alteração da forma, geometria do envoltório e aberturas, aumentando o número de volumes e possibilidades de alterar as fenestrações. As demais considerações, apontadas pontualmente pela amostra, foram: incorporar o entorno imediato, como vizinhos e vegetação; adicionar parâmetro para alteração dos materiais, inclusão de elementos de proteção solar, vegetação e cobertura verde; reduzir o tempo de processamento entre comandos; abranger outros ângulos de orientação solar entre volumetria e terreno; considerar outros aspectos de aferição, como iluminação natural; incorporar o gabarito preenchido manualmente no ambiente digital; permitir a manipulação digital da forma e aprimorar a visualização do modelo.

Na análise da amostra, presente na Tabela 21, identificou-se que 52,4% dos participantes declarou não conhecer método ou ferramentas de auxílio à tomada de decisões em fases iniciais. A maior parte dos participantes que mencionaram conhecer alguma ferramenta de auxílio, citaram o *SketchUp* e o uso de maquete física, sendo que apenas, um dos participantes referiu-se ao uso da calota solar utilizada no Laboratório de Conforto da sua unidade de ensino. O software de simulação e modelagem *DesignBuilder* foi mencionado mais de uma vez pelos participantes, enquanto os programas computacionais *Ecotect*, *Cityzoom*, *Dialux*, *Relux* e *Archicad* foram reportados uma única vez. As menções sobre softwares de modelagem e simulação demonstram que a amostra tem pouco contato com métodos de auxílio à tomada de decisões.

3.2.2 Identificação dos fatores que impactam o uso da ferramenta

Durante o acompanhamento do experimento e, posteriormente, com a análise dos vídeos e gravações foi possível identificar um conjunto de fatores que contribuíram positivamente ou negativamente para o uso do PASA como metodologia de auxílio à tomada de decisões.

3.2.3 Tempo

Na análise dos vídeos, verificou-se que a quantidade de tempo utilizada por cada usuário variou, minimamente, para o preenchimento do gabarito, sendo que alguns alunos desenharam a perspectiva com maior precisão e acurácia. Enquanto o usuário preenchia o gabarito, o modelo digital processava a simulação. Como a simulação demandava, de modo geral, menos de um minuto para ser executada, enquanto o usuário ainda estava preenchendo o gabarito a simulação já se encontrava pronta. Pode-se observar que o preenchimento do gabarito influenciou o processo de projeto, uma vez que todos os alunos utilizaram-o para verificar as decisões que haviam testado e fazer um prognóstico.

3.2.4 Gabarito

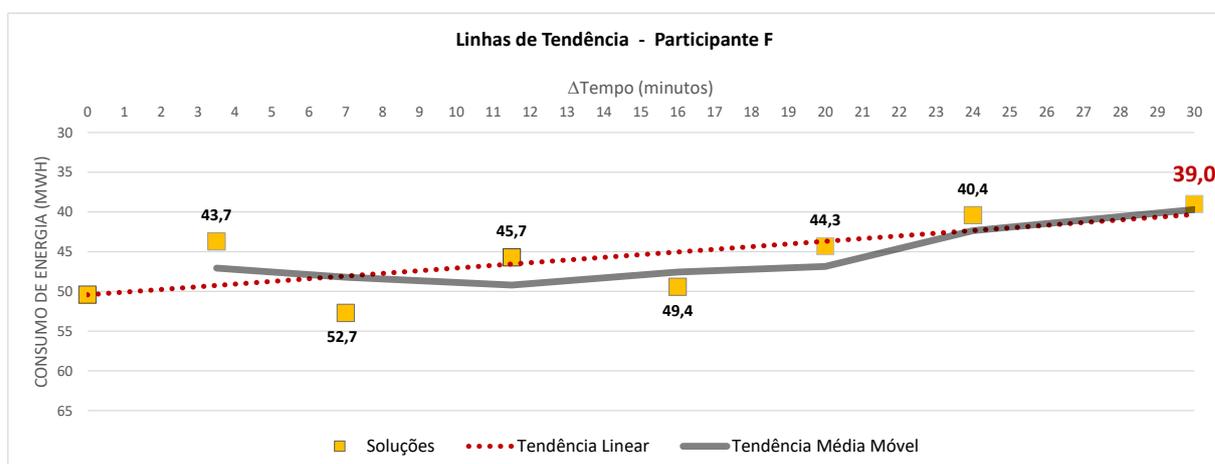
Ao assistir os vídeos pode-se perceber que após a quarta ou quinta geração, todos os alunos, ao menos uma vez, utilizaram o gabarito para recordar as soluções anteriores e assim, estruturar um prognóstico para a próxima forma a ser simulada. Ao mesmo tempo, que se observou como o gabarito auxiliou o processo, também percebe-se como o raciocínio desacelera nesse momento, pois a pausa causada pelo preenchimento dos dados, acaba interferindo no processo cognitivo. Em declaração verbal, ao final do exercício, um dos participantes relatou como seria promissor, adicionar ao modelo digital, uma tela que capturasse todos os dados, (incluindo os dados esboçados manualmente no papel). Outro participante

demonstrou que apreciaria ter um protocolo manual de desempenho para auxiliar o processo criativo.

3.2.5 Particularidades da amostra

Dentre os participantes que apresentaram maior dificuldade para explorar as soluções e estabelecer uma estratégia para redução do consumo foi encontrado um aluno de origem europeia a poucos meses cursando as disciplinas no Brasil. Acostumado ao comportamento solar no hemisfério norte em relação ao desempenho térmico e lumínico, o aluno demonstrou desconforto ao buscar uma estratégia de projeto. A dificuldade foi evidenciada na quantidade reduzida de soluções geradas durante os 30 minutos da tarefa – oito simulações realizadas. Foi o participante com o menor número de simulações realizadas, juntamente com o participante ‘A’ – que obteve o pior resultado final da tarefa. Diferentemente do participante ‘A’, e mesmo com o obstáculo enfrentado ao relacionar a orientação das fachadas, o participante ‘F’ obteve resultado expressivo, manifestando-se como 15° entre os 21 participantes da amostra. A dificuldade enfrentada pelo participante ‘F’ determina, juntamente com a linha de tendência traçada durante o processo de projeto (Figura 48), que a ferramenta de projeto utilizada, auxilia na tomada de decisões e evidencia potencial contribuição ao processo de aprendizagem.

Figura 48 Gráfico com Curvas de Tendência do participante “F”

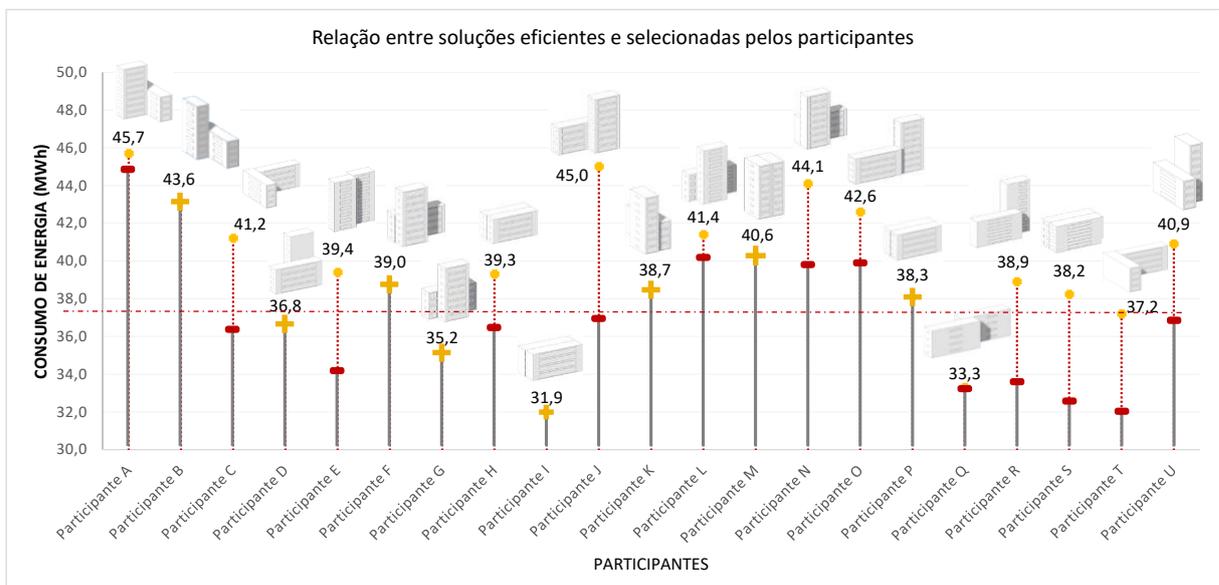


Fonte: elaborado pela autora.

3.2.6 Consideração de outros aspectos arquitetônicos

Ao considerar outros aspectos arquitetônicos como funcionalidade, plasticidade e conforto ambiental, a amostra expõe o impacto que o conhecimento empírico exerce durante o processo de projeto, mesmo que orientado por uma ferramenta de desempenho. Ao final do exercício, quando os participantes foram convidados a observar as soluções geradas ao longo do experimento, oito participantes – identificados na Figura 49 com ícone '+' amarelo – definiram a solução com menor consumo de energia, como a solução em potencial para prosseguir com o partido arquitetônico. Os demais elegeram outra solução, diferentemente da geometria que apresentava melhor performance. Analisando a descrição individual apresentada pelos participantes como justificativa para a seleção da forma mais adequada para o partido arquitetônico (Apêndice E) observa-se como os alunos consideraram outros atributos além da minimização do consumo de energia, como o conforto térmico e lumínico natural, salubridade, ventilação, sombreamento, proteção solar e funcionalidade do ambiente interno. Verifica-se como o PASA auxiliou os alunos a tomar decisões, algumas mais coerentes do que outras, porém sem abandonar uma linha de pensamento arquitetônico sedimentada.

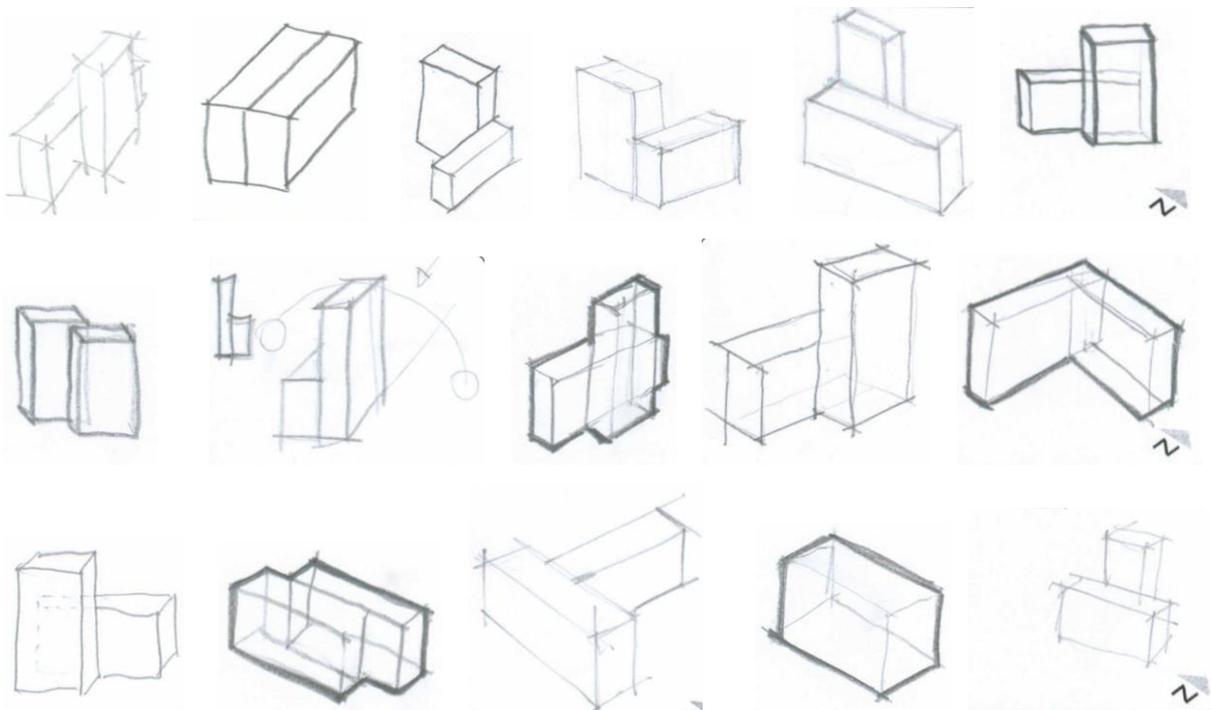
Figura 49 Gráfico mostrando a relação entre as soluções selecionadas pelos participantes e as soluções mais eficiente encontrada durante seu processo projetual



Fonte: elaborado pela autora.

O conhecimento implícito, modelado mentalmente e não relatado nos dados, pode ser evidenciado nas considerações justificadas no Apêndice E. O conhecimento explícito é sistematizado através de desenhos (Figura 50), dados expressos pelo preenchimento do gabarito – através da proporção de aberturas e croquis – e pelo gráfico evolutivo do modelo digital, contendo o resultado da simulação de energia para aquecimento e refrigeração do ambiente interno.

Figura 50 Exemplo de croquis elaborados durante o experimento



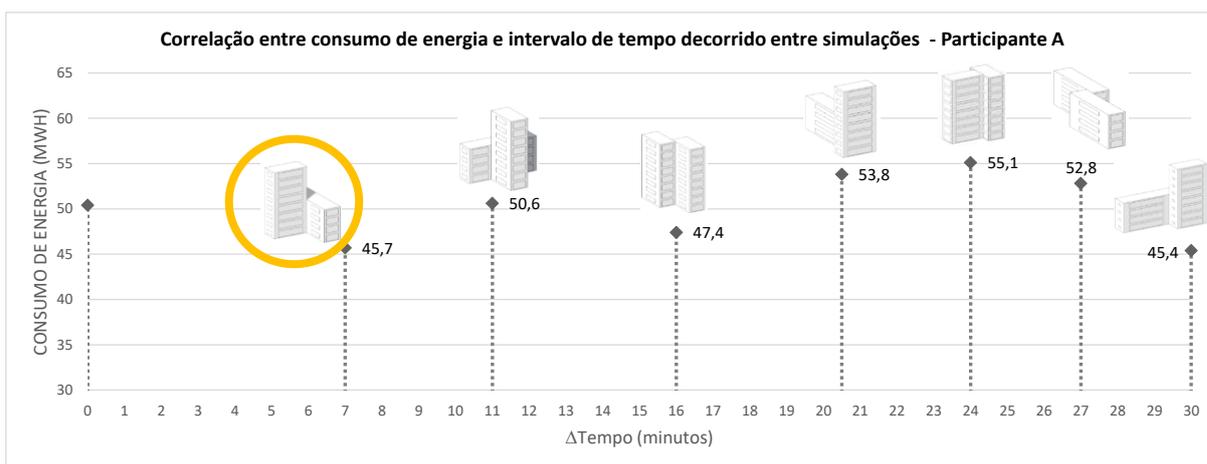
Fonte: elaborado pela amostra

3.2.7 Interface

Os participantes 'A' e 'B', obtiveram os resultados com maior consumo de energia, apresentando dificuldade em compreender o exercício. O participante A entendeu com facilidade o funcionamento do modelo físico, mas teve dificuldade para manipular a interface digital. A dificuldade encontrada pelo usuário 'A' é evidenciada, também, através de dados quantitativos, pelo baixo número de

soluções aferidas e pelo tempo despendido, principalmente, nas primeiras quatro simulações (Figura 51).

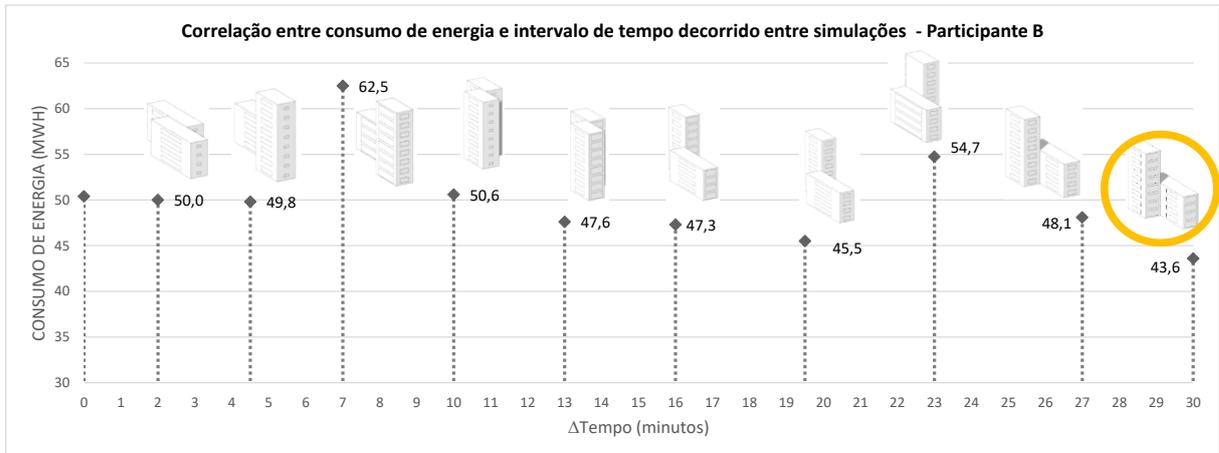
Figura 51 Gráfico correlacionando consumo de energia e tempo entre cada simulação do Participante 'A'



Fonte: elaborado pela autora.

O usuário 'B' manipulou e aferiu dez soluções de projeto, ao longo dos 30 minutos de exercício, estabelecendo uma média de dois a três minutos entre cada simulação, e demonstrando não ter tido dificuldade para utilizar a ferramenta de projeto (Figura 52). Mas, obteve o segundo pior resultado de desempenho da amostra geral, revelando sua dificuldade em constituir uma estratégia de resolução do problema. A estratégia para resolver o problema de projeto proposto, mesmo que com o auxílio da avaliação do desempenho, depende do conhecimento empírico, adquirido pelo graduando, anteriormente, e colocado em prática no momento do exercício.

Figura 52 Gráfico correlacionando consumo de energia e tempo entre cada simulação do Participante 'B'



Fonte: elaborado pela autora.

Analisando o processo de projeto e comportamento do participante 'I', que obteve o melhor resultado, pode-se observar uma definição clara das decisões de projeto, a partir da quarta solução aferida (Tabela 22). Como a forma inicial mantém um prisma vertical e outro horizontal, as duas soluções geométricas iniciais, mantêm a mesma estratégia, alterando apenas a proporção de aberturas e orientação dos volumes. Mas após experimentar ambos os volumes na posição horizontal e observar a minimização significativa do desempenho, o usuário manteve essa estrutura e continuou explorando outras configurações de abertura e combinação entre planos. A solução final expõe o menor consumo de energia, mas proporções reduzidas de planos translúcidos, fato descrito na sua justificativa. Por possuir poucas aberturas em leste e norte, o aluno declara a importância de avaliar a iluminação natural, assim como a ventilação natural, já que possui uma empena cega.

Tabela 22 Tabela com a sequência de manipulações da forma, proporção das aberturas, tempo e resultados de desempenho do Participante 'I'

Participante I 23anos 8ºsemestre

PARÂMETROS		SOLUÇÕES							
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
Tempo (min.)		0	1,00	3,00	5,50	8,00	12,00	15,00	19,00
Fenestras	F Norte	50%	50%	50%	50%	50%	75%	75%	25%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F Leste	75%	50%	75%	50%	50%	25%	25%	75%
	F Oeste	50%	50%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
Geometria (pers sudoeste)									
Desempenho (MWh)		50,4	40,7	44,3	39,5	36,9	42,6	43,7	36,6

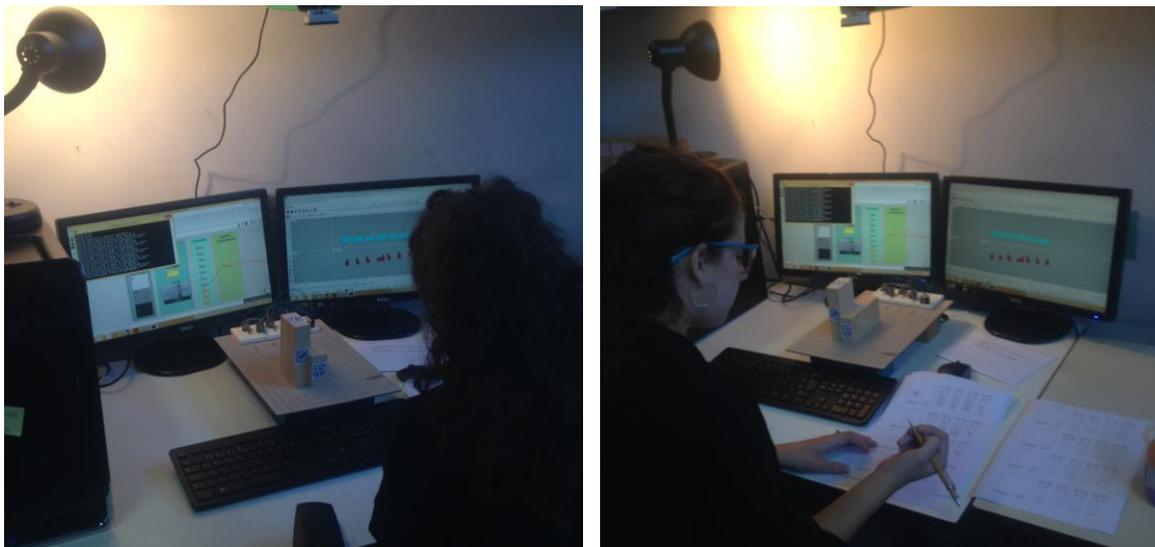
PARAMETROS		9°	10°	11°	12°
Tempo (min.)		22,50	24,50	27,00	30,00
Fenestras	F Norte	25%	25%	25%	25%
	F Sul	75%	75%	75%	75%
	F Leste	50%	50%	75%	25%
	F Oeste	25%	0%	0%	0%
Geometria (pers sudoeste)					
Desempenho (MWh)		34,0	33,5	36,5	31,9

Fonte: elaborado pela autora.

Ao utilizar o PASA (Figura 53) verificou-se que alguns alunos preocuparam-se em alinhar os prismas em relação à malha, mesmo que explicado no início do exercício, que essa questão não era determinante para a resolução do exercício. De qualquer maneira, isso não influenciou a tomada de decisões e tempo total da tarefa.

O preenchimento do gabarito foi predominantemente completado, durante o processamento da simulação, com exceção de um aluno, que sempre esperou a simulação apresentar o resultado, para, posteriormente, iniciar o preenchimento do gabarito. E as variações de tempo para o preenchimento variaram minimamente, sem exercer impacto significativo para o cumprimento da tarefa.

Figura 53 Registro do uso do PASA



Fonte: fotografia da autora

De modo geral, os relatos analisados em vídeo e as justificativas coletadas através do questionário, demonstraram o impacto que o PASA teve durante o exercício projetual, tendo em vista que os alunos preocuparam-se com o consumo de energia associando outros aspectos arquitetônicos, advindos do conhecimento adquirido com a prática de projeto.

CONCLUSÕES

A dificuldade em integrar a aferição do desempenho como uma ferramenta de auxílio as fases iniciais de projeto deve-se, em grande parte, ao número de informações requeridas pelos ambientes de projeto, assim como, pelos métodos de projeto adotados por arquitetos e graduandos. Esta tese propõe ao aluno de arquitetura um protótipo para exploração da forma e aferição do desempenho energético, como um método de auxílio à aprendizagem, contribuindo com o conhecimento tácito e instrumentalizando a tomada de decisões em EIP.

Partindo da hipótese que a antecipação de modelos simplificados de desempenho pode contribuir com o aumento da representação e repertório de soluções de projeto, a tese propõe o PASA (protótipo de ambiente simplificado de aprendizagem), um ambiente de manipulação da forma e aferição do consumo de energia para aquecimento e refrigeração de edificações comerciais. Através da antecipação da avaliação estruturada da performance energética, associando modelos físicos e digitais, conclui-se que o processo criativo pode ser auxiliado na busca por soluções energeticamente eficientes, desde as primeiras fases do projeto.

Buscando sistematizar e avaliar o processo de projeto que incorpora o uso de ferramentas de simulação nas fases iniciais, o experimento proposto pela tese analisa os resultados do processo de tomada de decisões de um grupo de alunos, com suporte de dados quantitativos advindos da simulação energética fornecido pelo PASA. Embora seja difícil rastrear as ações projetuais e ato de pensar do arquiteto, os resultados produzidos durante as soluções de projeto simuladas, permitiram identificar as sucessivas aproximações que nortearam a tomada de decisões.

A análise do impacto do uso do PASA por graduandos do curso de Arquitetura e Urbanismo, associando um modelo físico de manipulação a um modelo digital de desempenho, demonstrou que o PASA instrumentalizou o processo de tomada de decisões, contribuindo com o conhecimento empírico da amostra, assim como evidenciou a contribuição que a avaliação do desempenho pode exercer em EIP. Ao avaliar o PASA foi possível detectar o grau de aprendizagem e características de usabilidade da ferramenta, assim como, identificar os fatores que

impactam a minimização do consumo de energia para aquecimento e refrigeração de edificações comerciais.

Os resultados obtidos, a partir do experimento proposto, demonstram que os alunos utilizaram o modelo físico associado ao digital como uma ferramenta de auxílio à tomada de decisões, contribuindo para o processo de aprendizagem. Os vinte e um alunos que utilizaram o PASA, conseguiram reduzir o consumo de energia, enquanto observados sob a forma inicial proposta. O prognóstico parcial do processo de aprendizagem, delineado pela linha de tendência – traçada através da sequência de resultados gerados pela amostra – demonstra que os alunos apropriaram-se positivamente do PASA. As ações de projeto e o traçado da linha de tendência expressam a eficiência da associação do modelo físico e digital, como método de exploração e aferição da forma em etapas iniciais. A análise das ações projetuais expressou como explorar diferentes soluções de projeto é benéfico em EIP, visto que outras questões de projeto são ponderadas juntamente com os dados quantitativos de desempenho, conforme declarado nas respostas descritivas dos questionários. Estes fatos demonstram como o sentido exploratório da forma arquitetônica vinculado a dados quantitativos de performance são positivos para o processo criativos durante a aprendizagem. Constatou-se assim, que as informações estruturadas auxilia o processo de tomada de decisões em EIP, sem prejudicar os métodos tradicionais de projeto.

Ao avaliar o ambiente proposto pela tese, o mapeamento das ações identificou alguns aspectos comuns durante o processo projetual:

- (a) Manipulação individual dos volumes que compõem o envoltório. Durante o processo de minimização do consumo de energia, a maioria dos graduandos, explorou a composição volumétrica, mantendo a proporção dos planos translúcidos, em ao menos uma situação. A manipulação única da volumetria propiciou avaliar o impacto que a forma do envoltório exerce sobre o desempenho. Em algumas situações, o impacto da forma é mais expressivo do que em outras.
- (b) Manipulação individual das fenestraçãoes. Em alguns momentos do processo de projeto, observou-se a manipulação singular das fenestraçãoes, de modo que, os graduandos puderam compreender o impacto que a alteração apenas de planos translúcidos pode ocasionar no consumo de energia.

(c) Predominância das transformações geométricas rotação e translação ao iniciar a manipulação da forma, com uso do PASA. Prevaleceu o uso da manipulação da forma do envoltório, sempre que se inicia o processo de exploração e avaliação de uma nova solução de projeto. Essa característica identifica a importância dada para a composição volumétrica, uma vez que a alteração das fenestrações é deixada para um segundo momento.

(d) A relação entre os planos opacos e translúcidos aconteceu normalmente, após a alteração da geometria, evidenciando a relevância com que a composição volumétrica exerce sobre as fenestrações.

(e) A redução das ações projetuais não se relaciona com o desempenho da solução final de projeto. A quantidade de transformações geométricas executadas ao longo do processo de projeto não comprometeu o cumprimento da tarefa de minimização. Os dois participantes que atingiram o menor consumo de energia, apresentaram quantidade de ações distintas ao executar a tarefa. Um dos participantes realizou 11 simulações, executando 27 ações, enquanto o outro realizou 12 simulações e 49 ações. Ambos obtiveram o mesmo resultado de desempenho, porém com ações de projeto distintas. Esse aspecto avaliado confirma como o conhecimento empírico impacta o processo projetual. Mas, também, comprova a relevância que ferramentas de auxílio à tomada de decisões, antecipando o desempenho da forma, podem exercer em EIP. Pois mesmo que possuam conhecimentos distintos, podem atingir, em um curto espaço de tempo, soluções igualmente eficientes.

(f) A quantidade total de soluções aferidas influencia na busca pelas soluções eficientes. Mesmo que o processo de projeto seja auxiliado por um ambiente de simulação, não deixa de ser um processo heurístico, de tentativa e erro, na busca pelas soluções mais eficiente. Deste modo, a quantidade de simulações realizadas influenciou na busca por soluções que minimizassem o consumo de energia. A análise do processo de projeto evidenciou que os alunos que obtiveram as soluções com maior consumo de energia, realizaram o menor número de simulações, com exceção de um caso.

Além de avaliar o processo de projeto e as ações adotadas durante a minimização do consumo de energia, identificaram-se os fatores que impactam na minimização do consumo de energia para aquecimento e refrigeração de edificações

comerciais, compostas por materiais de baixa transmitância térmica. Os fatores identificados foram: compactação da volumetria, horizontalização, redução dos planos translúcidos, eficiência das fachadas norte e sul em detrimento das fachadas leste e oeste, orientação solar dos planos opacos e translúcidos.

O PASA, ambiente de aprendizagem e auxílio à tomada de decisões mostrou-se eficiente em 90% da amostra, conforme a tendência traçada pelas soluções de projeto geradas. No entanto, todos os graduandos atingiram o objetivo de minimizar o consumo de energia, considerando a forma inicial fornecida no início do experimento. Demonstra-se assim, que a associação das ferramentas físicas e digitais, propostas pela metodologia, pode ser utilizada como diretriz para o desenvolvimento de objetos de aprendizagem. Para etapas futuras da pesquisa, pretende-se aferir o comportamento da metodologia em ambiente de aprendizagem de projeto arquitetônico, mensurando possíveis alterações do processo de projeto e resultados, quando implementado em grupos ou como complementação na discussão de outros aspectos de projeto.

Para a validação da abordagem sobre o aspecto aprendizagem, outros fatores devem envolver a análise do PASA, como aspectos cognitivos e emocionais. Futuros trabalhos podem aplicar outros protocolos de avaliação, como o método *think-aloud*, envolvendo a participação dos usuários em voz alta e abordando assim, a identificação declarada das ações. A futura aplicação do protocolo *think-aloud* poderia verificar quanto o mapeamento das ações projetuais corresponde às intenções declaradas pelos usuários.

Além de aprofundar o impacto das ações de projeto através de método declarativo de análise, outras linhas de pesquisa poderiam ser adotadas para trabalhos futuros, como:

(a) Validação da eficiência da metodologia através de experimento em ambiente de ensino, confrontando grupo teste e controle. O grupo teste adotaria o PASA para guiar o processo de projeto, exploração da forma e partido associado ao desempenho energético. Enquanto o grupo controle utilizaria métodos habituais para o desenvolvimento da mesma tarefa, como o uso de *SketchUp* – que foi o software mais mencionado nos questionários apresentados neste trabalho.

(b) Verificação do impacto da metodologia em profissionais experientes, identificando a eficiência ao antecipar a avaliação estruturada da performance na prática do escritório de arquitetura. A avaliação sob esse aspecto poderia analisar o impacto causado ao final do processo, quando comparado com os métodos tradicionais utilizados pelos profissionais, além de verificar o impacto de tempo e custo final do projeto.

(c) Incorporar, tanto ao modelo físico quanto digital, elementos de contextualização, como edificações vizinhas, vegetação e mobiliário urbano, verificando as contribuições arquitetônicas e o impacto sobre o tempo de simulação. Outras variáveis poderiam ser manipuláveis conforme descrito pela amostra, como a parametrização dos materiais e empilhamento dos prismas. A associação de outras variáveis e exploração de formas e problemas com maior complexidade podem ser avaliados em trabalhos futuros, mas considerando o retorno ágil e preciso da simulação, de modo que o tempo de processamento computacional não afete o processo cognitivo, e conseqüentemente, tornando-se ineficiente como ferramenta para EIP.

(d) Além de incorporar outras restrições e variáveis ao modelo, seria possível adicionar ou alterar o critério de desempenho avaliado. As mesmas ferramentas computacionais disponibilizam a aferição de outras variantes de consumo e tipos de ar condicionado (além do aferido por este trabalho), assim como, poderia se avaliar o desempenho térmico ou lumínico da forma gerada.

Independente da linha de pesquisa adotada, o foco nos próximos anos é uma investigação aprofundada do uso de ferramentas de aprendizagem em ambiente de ensino e profissional. É necessário entender como a avaliação estruturada pode contribuir com os diferentes níveis de conhecimento abordados durante o processo projetual. As pesquisas avaliadas na fundamentação teórica apontam de modo veemente a importância que o aperfeiçoamento dos procedimentos que incorporem a avaliação do desempenho em EIP. Esta tese corrobora com esta visão, ao identificar as contribuições de uma metodologia associando modelos físicos e digitais como ferramenta de auxílio a tomada de decisões, e ao lançar diretrizes que possam ser utilizadas na construção de outros métodos ou objetos de aprendizagem.

REFERÊNCIAS

ADDINGTON, Michelle; SCHODEK, Daniel. **Smart materials and new technologies: for the architecture and design professions**. 1. ed. Oxford: Elsevier, 2005.

AISH, Robert; PRATAP, Aparajit. Spatial information modelling of buildings using non-monifold topology with ASM and designscript. In: **ADVANCES IN ARCHITECTURAL GEOMETRY**, 2012, Vienna. **Anais eletrônicos...** Vienna: Springe, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7091-1251-9_1#citeas>. Acesso em: 10 jul. 2016.

AKSAMIJA, Ajla. **Sustainable facades: design methods for high-performance building envelopes**. New Jersey: Wiley, 2013.

ALBERTI, Leon Battista. *Da Arte Edificatória*. Tradução de A. M. E. Santo. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2011.

ALEXANDER, Christopher; ISHIKAWA, Sara; SILVERSTEIN, Murray; JACOBSON, Max FIKSDAHL-KING Ingrid. ANGEL, Shlomo. *A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction*. New York: Oxford University Press, 1977.

ASHRAE Handbook Fundamentals. Inch-Pound Edition. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 2013.

ATTIA, Shady; HENSEN, Jan; BELTRÁN, Liliana; HERDE, André de. Selection criteria for building performance simulation tools: Contrasting architects' and engineers' needs. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 5, n. 3, p. 155-169, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/254220572_Selection_criteria_for_building_performance_simulation_tools_Contrasting_architects%27_and_engineers%27_needs>. Acesso em: 03 mai. 2016.

ATTIA, Shady; HAMDY, Mohamed; BRIEN, William O.; CARLUCCI, Salvatore. Computational Optimization for Zero Energy Building design: interviews results with twenty eight international experts. In: **CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION**, 13., 2013, Chambéry. p. 698-705. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Salvatore_Carlucchi2/publication/259872365_Statistical_analysis_of_ranking_capability_of_long-term_thermal_discomfort_indices_and_their_adoption_in_optimization_processes_to_support_building_design/links/0deec5300ec33037f0000000.pdf>. Acesso em: 05 out. 2016.

BRAASCH, Elzine. The feasibility of 'building performance sketching' within the building design process. 2016. 137f. Thesis (Master of Building Science) – School of Architecture, Victoria University of Wellington, Wellington, 2016. Orientadores Dr Michael Donn.

BRIGITTE, Giovanna Tomczinski Novellini; RUSCHEL, Regina Coeli. Modelo de informação da construção para o projeto baseado em desempenho: caracterização e processo. **Ambient. Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 4, p. 9-26, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212016000400009&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 03 out. 2016.

BROEK, Johan J.; SLEIJFFERS, Wouter; HORVÁTH, Imre. Using physical models in design. In: CAID/CACD 2000, Hong Kong, 2000. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.142.4730&rep=rep1&type=pdf>> Acesso em: 23 mai. 2016.

BROOKES, Alan; GRECH, Chris. The Building Envelope: applications of new technology cladding. London: Butterworth Architecture, 1990.

BUCHANAN, Richard. Wicked Problems in Design Thinking. Design Issues, v. 8, n.2, Spring, 1992. p. 5-21.

BUENO, Ernesto. TURKIENICZ, Benamy. Supporting Tools for Early Stages of Architectural Design. **International Journal of Architectural Computing**, v.12, n. 4, p. 495-512, 2014.

BUENO, Ernesto. Uso de tecnologias digitais em etapas iniciais de projeto arquitetônico. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

BURRY, Mark. Between Intuition and Process: Parametric Design and Rapid Prototyping. In Kolarevic B., ed. Architecture in the Digital Age – Design and Manufacturing. New York: Spon Press, 2003.

CARVALHO, João Pedro Polónia da Silva. Medidas de eficiência energética nas instalações da Rodonorte Transportes Portugueses, S.A. 2015. 85 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente) – Departamento de Engenharia Química, Universidade do Porto, Porto, 2015.

CELANI, Gabriela. Além da avaliação energética e ambiental nas etapas iniciais do processo de projeto. PARC – Pesquisa em Arquitetura e Construção Unicamp, v.3, n.2. p. 56-64, 2012. Disponível em: <<http://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8634568/2489>> Acesso em: 24 set. 2016.

CELANI, Gabriela; CYPRIANO, Débora; GODOI, Giovana de; VAZ, Carlos Eduardo. A gramática da forma como metodologia de análise e síntese em arquitetura. **Revista Conexão – Comunicação e Cultura**, Caxias do Sul, v. 5, n. 10, 2006.

CHLELA, Fadi; HUSAUNDEE, Ahmad; INARD, Christian; RIEDERER, Peter. A new methodology for the design of low energy buildings. Energy and Buildings, v. 41, 2009. p. 982-990. Disponível em: <<http://fulltext.study/preview/pdf/264676.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2016.

COOKE, Nancy J. Knowledge elicitation. In: DURSO, Francis, T. Handbook of applied cognition. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1999. p.479-509.

CORMEN, Thomas H.; LEISERSON, Charles E.; RIVEST, Ronald L.; STEIN, Clifford. Introduction to Algorithms. 3. ed. Cambridge: MIT Press, 2009.

CRAWLEY, Drury B.; LAWRIE, Linda K.; WINKELMANN, Frederick C.; BUHL, W. F.; HUANG, Y. Joe; PEDERSEN, Curtins O.; STRAND, Richard K.; LIESEN, Richard J.; FISCHER, Daniel E.; WITTE, Michael J.; GLAZER Jason. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. Energy and Buildings, v. 33, p. 319-331. Great Britain: Elsevier Science, 2001.

CROSS, Nigel. Forty Years of Design Research. **Design Studies**, v. 28, n.1, p. 1-4, Jan. 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142694X06000792>>. Acesso em: 18 jun. 2016.

DESCARTES, René. Discurso do método. Tradução de Maria Ermantina Galvão. 3. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2001. (Título original: Le Discours de La Méthode, originalmente publicado em 1637).

DIX, Alan; FINLAY, Janet; ABOWD, Gregory D.; BEALE, Russell. Human-computer interaction. 3. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2004.

DO, Ellen Yi-Luen; GROSS, Mark D. Back to the real world: tangible interaction for design. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, v. 23, p. 221-223, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/220306584_Back_to_the_real_world_Tangible_interaction_for_design>. Acesso em: 23 ago 2017.

DUARTE, Vanessa Cavalcanti Paes. Comparação do desempenho energético de sistemas de climatização para uma edificação comercial em Florianópolis/sc. 2014. 184f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2014.

FANG, Yuan. Optimization of daylighting and energy performance using parametric design, simulation modelling, and genetic algorithms. 2017. 123f. Dissertation (Graduate Faculty of North Carolina State University) – Depart of Design, North Carolina State University, Raleigh, 2017. Orientador Sooyeon Cho. Disponível em: <<http://escholarship.org/uc/item/2zs2h81m>>. Acesso em: 26 out. 2017.

FANGER, Powl O. Thermal Comfort: analysis and applications in environmental engineering. New York: McGraw-Hill, 1972.

FIALA, Mark. ARTag, a fiducial marker system using digital techniques. IN: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, v. 2, p. 590-596, 2005. Disponível em: <<https://inside.mines.edu/~whoff/courses/EENG512/lectures/other/ARTag.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2017.

FLORIO, Wilson. Croquis de concepção no processo de projeto em arquitetura. Exacta, São Paulo, v. 8, n. 3. p. 373-383, 2010.

FLORIO, Wilson. Raciocínio analógico paramétrico: uma experiência criativa em arquitetura. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL – SIGRADI, 15., 2011, Santa Fé. Anais... Santa Fé: CumInCAD, 2011 (a). p. 38-41. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/data/works/att/sigradi2011_086.content.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2016.

FLORIO, Wilson. Análise do processo de projeto sob a teoria cognitiva: sete dificuldades no atelier. Arquitetura Revista, São Leopoldo, v. 7, n. 2, p. 161-171, jul./dez. 2011 (b). Disponível em: <<http://revistas.unisinos.br/index.php/arquitetura/article/viewFile/arq.2011.72.06/640>>. Acesso em: 04 out. 2017.

FLORIO, Wilson; SEGALL, Mario Lasar; ARAÚJO, Nieri Soares de. A contribuição dos protótipos rápidos no processo de projeto em arquitetura. In: INTERNATIONAL

CONFERENCE ON GRAPHICS ENGINEERING FOR ARTS AND DESIGN – GRAPHICA, 7., 2007, Curitiba. Anais... Curitiba: Exatas, 2007. Disponível em: < <http://www.exatas.ufpr.br/portal/degraf/graphica2007a/>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

FLORIO, Wilson; TAGLIARI, Ana. Fabricação digital de maquetes físicas: tangibilidade no processo de projeto em arquitetura. *Exacta*, São Paulo, v. 9, n. 1. p. 125-136, 2011.

FLORIO, Wilson; TAGLIARI, Ana. O uso de cortadora a laser na fabricação digital de maquetes físicas. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL – SIGRADI, 12., 2008, Cuba. Anais... Cuba: CumInCAD, 2008. p.1-8. Disponível em: < http://cumincades.scix.net/data/works/att/sigradi2008_086.content.pdf>. Acesso em: 29 set. 2016.

FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. Manual de conforto térmico. 7. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2003.

FUJIOKA, Paulo Yassuhide. Maquetes no ensino de história da arquitetura: experiências de estágio de ensino na FAUUSP. **Revista do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP**. São Paulo, SP, n.17, jun. 2005. Disponível em: < <https://www.revistas.usp.br/posfau/article/view/43399/47021>>. Acesso em: 28 mar. 2016.

GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GRANADEIRO, Vasco; DUARTE, José P.; CORREIA, João R.; LEAL, Vítor M. S.; Building envelope shape design in early stages of the design process: Integrating architectural design systems and energy simulation. **Automation in Construction**, n. 32, 2013. p. 196-209. Jul. 2013. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/257371570_Building_envelope_shape_design_in_early_stages_of_the_design_process_Integrating_architectural_design_systems_and_energy_simulation>. Acesso em: 18 fev. 2016.

HASTINGS, Robert; WALL, Maria. Sustainable Solar Housing: Strategies and solutions. London: Earthscan, 2009.

HEIM, Steven. The resonant interface: HCI foundations for interaction design. New York: Pearson Addison-Wesley, 2008.

HENSEN, Jan L. M.; LAMBERTS, Roberto. Building Performance Simulation for Design and Operation. 1 ed. New York e Oxon: Spon Press, 2011.

HU, Shi-Min.; LI, You-Fu; JU, Tao; ZHU, Xiang. Modifying the shape of NURBS surfaces with geometric constraints. *Computer-Aided Design* 33, 2001. p. 903-912. Disponível em < <http://cg.cs.tsinghua.edu.cn/~shimin/pdf/nurbs.pdf> >. Acesso em: 11 nov 2015.

IEA: International Energy Agency, Energy Efficiency Requirements in Building Codes, Energy Efficiency Policies for new buildings, 2008. Disponível em:<<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/energy-efficiency-requirements-in-building-codes---policies-for-new-buildings.html>>. Acesso em 10 set. 2015.

ISHII, Hiroshi; RATTI, Carlo; PIPER, Ben; WANG, Yao; BIDERMAN, Assaf; BEN-JOSEPH, Eran. Bringing clay and sand into digital design – continuous tangible user interfaces. **BT Technology Journal**, v.22, n.4, p. 287-299, 2004.

ISA, Sti Salwa. Classifying physical models and prototypes in the design process: a study on the economical and usability impact of adopting models and prototypes in the design process. In: INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE, 13., 2014, Dubrovnik. Anais eletrônicos... Dubrovnik: Design Society, 2014. p. 2071-2082.

JABI, Wassim. Digital tectonics: the intersection of the physical and the virtual. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE – ACADIA, 23., 2004, Ontario. Anais eletrônicos... Ontario: CumInCAD, 2004. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia04_256.content.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2017.

JABI, Wassim. Parametric spatial models for energy analysis in the early design stages. In: SYMPOSIUM ON SIMULATION FOR ARCHITECTURE AND URBAN DESIGN – SimAUD, 5., 2014, Tampa. Anais... Tampa: ACM/SIGSIM, 2014. p. 17-24.

JABI, Wassim. The potential of non-manifold topology in the early design stages. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE – ACADIA, 15., 2015, Vienna. Anais eletrônicos... Vienna: CumInCAD, 2015. p. 380-393.

JOHNSON, Steven. Cultura da interface: como o computador transforma nossa maneira de criar e comunicar. Rio de Janeiro: Zahar, 2001.

JONES, John Chris. Design Methods. New York: Wiley, 1992.

KALAY, Yehuda E.; CARRARA, Gianfranco. A performance-based paradigm of design. In: GERO, John S. Advances in formal design methods for CAD. London: Chapman and Hall, 1996. p. 107-135.

KALAY, Yehuda E. Performance-based design. **Automation in Construction**, n.8, p. 395-409. Abril, 1999. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/222065234_Performance-based_design>. Acesso em: 9 maio 2015.

KIM, Mi Jeong; MAHER, Mary Lou. The impact of tangible user interfaces on designers' spatial cognition. **Design Studies**, v.29, n.3, p. 222-253, Maio 2008.

KOLAREVIC, Branko. Architecture in the digital age: design and manufacturing. 1. ed. New York: Spon Press, 2003.

KOLAREVIC, Branko. and MALKAWI, Ali M. Performative Architecture – Beyond Instrumentality. New York: Spon Press, 2005.

KONIS, Kyle; GAMAS, Alejandro; KENSEK, Karen. Passive performance and building form: na optimization framework for early-stage design support. **Solar Energy**, n. 125, p. 161-179, Fev. 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/289501910_Passive_performance_and_building_form_An_optimization_framework_for_early-stage_design_support>. Acesso em: 23 fev. 2017.

KOWALTOWSKI, Doris C. C. K.; CELANI, Maria Gabriela C.; MOREIRA, Daniel de Carvalho; PINA, Silvia. A. M. G.; RUSCHEL, Regina Coeli; SILVA, Vanessa Gomes da; LABAKI, Lucila Chebel; PETRECHE, João Roberto D. Reflexão sobre metodologias de projeto arquitetônico. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 6, n. 2, p.07-19, abr/jun, 2006.

KOWALTOWSKI, Doris C. C. K. O processo de projeto em arquitetura: da teoria a tecnologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. Eficiência Energética na Arquitetura. 3ed. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2014.

LAWSON, Bryan. How Designers Think: The Design Process Demystified. Oxford (UK): Elsevier Architectural Press, 2005.

LENNINGS, Alex F.; BROEK, Johan J.; HORVÁTH, Imre; SLEIJFFERS, Wouter; SMIT, A de. Editable physical models for conceptual design. In: PROCEEDINGS OF THE TMCE2000 SYMOSIUM, 1., 2000, Delft. p. 665-674. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.142.4663&rep=rep1&type=pdf>> Acesso em: 23 mai. 2016.

LIN, Shih-hsin Eve; GERBER, David Jason. Designing-in performance: a case study of a net zero energy school design. In: PROCEEDINGS OF THE PLEA2013 CONFERENCE, 29., 2013, Munich. Disponível em: < <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1169272/1169272.pdf>> Acesso em: 02 out. 2016.

LOVELL, Jenny. Building Envelopes An Integrated Approach. New York: Princeton Architectural Press, 2010.

MACKEY, Cristopher; ROUDSARI, Mostapha S.; SAMARAS, Panagiotis. ConfortCover: a novel method for the design of outdoors shades. In: SYMPOSIUM ON SIMULATION FOR ARCHITECTURE AND URBAN DESIGN – SIMAUD, 2015, Washington. **Anais eletrônicos...** Washington: SpringSim, 2015. Disponível em: < <https://www.semanticscholar.org/paper/ComfortCover-a-novel-method-for-the-design-of-outd-Mackey-Roudsari/573bd194b2eaae0114902cded646b1baef8b51eb> >. Acesso em: 26 out. 2017.

MACKEY, Cristopher; ROUDSARI, Mostapha S. The tool(s) vs. the toolkit. In: DESIGN MODELING SYMPOSIUM, 2017, Paris. **Anais eletrônicos...** Paris: Proceedings of the Design Modeling Symposium, 2017. Disponível em: < <http://www.ladybug.tools/assets/pdf/ToolvsToolkit.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2017.

MACKEY, Cristopher; BARANOVA, Vera; PETERMANN, Lynn; MENCHACA-BRANDAN, Alejandra. Glazing and Winter Comfort Part 2: An Advanced Tool for Complex Spatial and Temporal Conditions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 15., 2017, San Francisco. **Anais eletrônicos...** San Francisco: Building Performance Simulation Association, 2017 (a). Disponível em <https://www.conftool.pro/bs2017/index.php?page=browseSessions&downloads=show&form_session=116&presentations=show>. Acesso em 26 out. 2017.

MACKEY, Cristopher; GALANOS, Theodore; NORFORD, Leslie; ROUDSARI, Mostapha S. Wind, sun, surface temperature, and heat island: the critical variables for high-resolution outdoor thermal comfort. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 15., 2017, San Francisco. **Anais eletrônicos...** San Francisco: Building Performance Simulation Association, 2017 (b). Disponível em <https://www.conftool.pro/bs2017/index.php?page=browseSessions&downloads=show&form_session=116&presentations=show>. Acesso em 26 out. 2017.

MACLEAMY, 2004 apud MANZIONE, Leonardo. Proposição de uma estrutura conceitual de gestão do processo de projeto colaborativo com o uso do BIM. 325 f. Tese (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MARK, Earl; MARTENS, Bob; OXMAN, Rivka. The Ideal Computer Curriculum. In: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE – eCAADe, 19., 2001, Helsinki. Architectural Information Management. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2001. p. 168-175.

MARÚ, Ana Flávia M.; FURTADO, Rodolpho Teixeira. Processos criativos no curso de arquitetura. In KNEIB, Erika Cristiane. Projeto e cidade, ensaios acadêmicos. Goiás: Funape, 2013.

MAVER, Thomas W. Software Tools for the technical evaluation of design alternatives. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN FUTURES – CAAD Futures, 2., 1987, Netherlands: Eindhoven, 1988. p. 47-58.

MCTEAR, Michael F. Intelligent interface technology: from theory to reality?. Interacting with Computers, v.12, n.4, 2000. p. 323-336.

MENDES, Nathan; WESTPHAL, Fernando S.; LAMBERTS, Roberto; NETO, José A. Bellini da Cunha. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. Ambiente Construído. Porto Alegre, v.5, n.4, 2005. p. 47-68.

MILLS, Criss B. Projetando com maquetes. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.

MITCHELL, William J. A lógica da arquitetura. Tradução: Gabriela Celani. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

MITCHELL, William J. The theoretical foundation of computer-aided architectural Design. Environment and Planning B: Planing and Design, Londres, v. 2, 1975. p. 127-150.

NEGENDAHL, Kristoffer. Building performance simulation in the early design stage: an introduction to integrated dynamics models. **Automation in Construction**, n. 54, p. 39-53, Jun. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/274736654_Building_performance_simulation_in_the_early_design_stage_An_introduction_to_integrated_dynamic_models. >. Acesso em: 10 out. 2016.

NIELSEN, Toke Rammer. Simple tool to evaluate energy demand and indoor environment in the early stages of building design. Solar Energy, v.78, n.1, 2005. p. 73-83

NONAKA, Ikujiro; TAKEUCHI, Hirotaka. The knowledge-creating company. Oxford University Press, 1995.

OEHLBERG, Lora; LAU, Kimberly; AGOGINO, Alice. Tangible interactions in a digital age: Medium and graphic visualization in design journals. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, AIEDAM, v.23, p. 237-249, 2009.

OKOCHI, Godwine Swere; YAO, Ye. A review of recent developments and technological advancements of variable-air-volume (VAV) air-conditioning systems. Renewable and

Sustainable Energy Reviews, v.59, 2016. p. 784-817. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/291556190_A_review_of_recent_developments_and_technological_advancements_of_variable-air-volume_VAV_air-conditioning_systems>. Acesso em: 12 nov. 2016.

OLIVEIRA, Juliano C. Cecílio Batista; PINTO, Gelson de Almeida. O movimento dos métodos de projeto. **Revista Arquitectos**, São Paulo, ano 09, n. 105.06, 2009. Disponível em <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitectos/09.105/77> Acesso em 10 jul 2015.

OMIDFAR, Azadeh; WEISSMAN, Daniel A. Design with Climate: The role of Digital Tools in Computational Analysis of Site-Specific Architecture. In KARA, Hanif; GEORGOULIAS, Andreas. *Interdisciplinary Design: New Lessons From Architecture and Engineering*. Barcelona, New York: ActarD, 2012. p. 125-131.

OXMAN, Rivka. Design by re-representation: a model of visual reasoning in design. **Design Studies**, v.18, n.4, p. 329-347, oct. 1997.

OXMAN, Rivka. Theory and Design in the First Digital Age. **Design Studies**, v.27, n.3, p.229-265, Maio, 2006.

OXMAN, Rivka. Performance-based Design: Current Practices and Research Issues. **International Journal of Architectural Computing**, v.6, n.1, p. 01-17, Jan. 2008.

OXMAN, Rivka. Performative Design: A Performance-based Model of Digital Architectural Design. *Environment and Planning B: Planning & Design*, v. 36, n. 6, p. 1026-1037, 2009.

PAPANIKOLAOU, Dimitris. Changing Forms, Changing Processes. In KARA, Hanif; GEORGOULIAS, Andreas. *Interdisciplinary Design: New Lessons From Architecture and Engineering*. Barcelona, New York:ActarD, 2012. p. 106-114.

PEDRINI, Aldomar. Integration of Low Energy Strategies to the Early Design Stages of Design Processo of Office Buildings in Warm Climate. Tese de Doutorado em Filosofia: The UniversityofQueensland, 2003. Orientador: Dr. Steven Szokolay, Coorientador: Dr. Richard Hyde. Disponível em http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/TESE_Aldomar_Pedrini.pdf Acesso em 8 out 2015.

PEREIRA, Cláudia D.; GHISI, Enedir. Calibração de um modelo computacional de uma residência unifamiliar localizada em Florianópolis. ENLAC e ELACAC: Encontro Nacional e Latino-Americano de Conforto Ambiental Construído. Campinas, 2015.

PICCO, Marco; LOLLINI, Roberto; MARENGO, Marco. Towards energy performance evaluation in early stage building design: a simplification methodology for commercial building models. *Energy and Buildings*, v. 76, 2014. p. 497-505.

PINTO, Geraldo Souza Pithon; PIMENTA, João Manoel Dias; AMORIM, Cláudia Naves David; BIRCK, Márcia Bocacio. Proposta de edifício experimental com balanço energético nulo. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO – MERCOFRIO, 9., 2014, Porto Alegre. Anais eletrônicos... Porto Alegre: Associação Sul Brasileira de Refrigeração, Ar condicionado, Aquecimento e Ventilação, 2014. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/mercofrío2014/anais/trabalhos.html>>. Acesso em: 31 jul. 2016.

POLANYI, Michael. *The tacit dimension*. London: Routledge, 1966.

PRATES, Raquel Oliveira; BARBOSA, Simone Diniz Junqueira. Avaliação de interfaces de usuários: conceitos e métodos. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO, Jornada de atualização em Informática – JAI, 2003. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Raquel_Prates/publication/265936448_Capitulo_6_Introducao_a_Teoria_e_Pratica_da_Interacao_Humano_Computador_fundamentada_na_Engenharia_Semiotica/links/553960d00cf247b858812c9a.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2016.

PRATES, Raquel Oliveira; BARBOSA, Simone Diniz Junqueira. Introdução à teoria e prática da interação humano computador fundamentada na engenharia semiótica. In: T. Kowaltowski; K. K. Breitman. (Org.). Atualizações em Informática 2007. Porto Alegre. : Editora PUC-Rio. 2007. p. 263-326.

PUPO, Regiane; PINHEIRO, Érica; MENDES, Gelly; KOWALTOWSKI, Doris; CELANI, Gabriela. A design teaching method using shape grammars. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GRAPHICS ENGINEERING FOR ARTS AND DESIGN, 7., 2007, Curitiba. Anais eletrônicos... Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007. Disponível em: <http://www.exatas.ufpr.br/portal/docs_degraf/artigos_graphica/ADESIGN.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2016.

RAMOS, G.; GHISI, E. Avaliação do cálculo da iluminação natural realizada pelo programa EnergyPlus. AmbienteConstruído (online), v. 10, n. 2, 2010. p. 157-169.

REICHARD, Georg; PAPAMICHAEL, Konstantinos M. Decision-making through performance simulation and code compliance from the early schematic phases of building design. **Automation in Construction**, n.14, p. 173 – 180, Mar. 2005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/30874227_Decision-making_through_performance_simulation_and_code_compliance_from_the_early_schematic_phases_of_building_design>. Acesso em: 10 out. 2016.

REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *Leukos*, v. 3, n. 1, 2006. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.458.8133&rep=rep1&type=pdf> Visitado em 03 set 2015.

RITTEL, H. W. J.; WEBBER, M. M. Dilemmas in a General Theory of Planning. Amsterdam: Elsevier, 1973. p. 155-169.

RITTER, Fabian; Schubert, Gerhard; GEYER, Philipp; BORRMANN, André; PETZOLD, Frank. Design decision support – real-time energy simulation in the early design stages. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING IN CIVIL AND BUILDING ENGINEERING, 14., 2014, Orlando. Disponível em: <http://www.cms.bgu.tum.de/publications/Ritter_2014_iccbe.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2016.

RIVARD, H.; BÉDARD, C.; HA, K. H.; FAZIO, P. Shared conceptual model for the building envelope design process. *Building and Environment*, Vol. 34. Pergamon, 1999. 175-187p. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132398000055>> Acesso em 10 jul. 2014.

PREECE, Jennifer; ROGERS, Yvonne; SHARP, Helen. Interaction design: beyond human-computer interaction. New York: John Wiley & Sons, 2002.

ROSE, Cody M. Towards interactive sustainable neighborhood design: combining a tangible user interface with real time building simulation. 2015. 74f. Dissertação (Master of Science in

Building Technology) – Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, 2015.

ROUDSARI, Mostapha Sadeghipour; PAK, Michelle. Ladybug: A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. In: INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION CONFERENCE – IBPSA, 13., 2013, Lyon, France. Disponível em: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_2499.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2016

ROUDSARI, Mostapha Sadeghipour; SUBRAMANIAM, Sarith. Automate radiance workflows through python. In: INTERNATIONAL RADIANCE WORKSHOP, 15., 2016, Padua, Italy. Disponível em: <<https://www.radiance-online.org/community/workshops/2016-padua/presentations/213-SadeghipourSubramaniam-AutomatingWorkflows.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2017.

SADINENI, S. B.; MADALA, S.; BOEHM R. F. Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, v. 15, n. 8, 2011. p. 3617–3631.

SALAMONE, Francesco; BELUSSI, Lorenzo; DANZA, Ludovico; GALANOS, Theodore; GHELLERE, Matteo; MERONI, Italo. Design and development of a nearable wireless system to control indoor air quality and indoor lighting quality. *Sensors*. v. 17, n.5, 2017. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/17/5/1021>>. Acesso em: 26 out. 2017.

SALMASO, Jéssica; VIZIOLI, Simone Helena Tanoue. O uso do modelo físico e digital nos processos de projeto da arquitetura contemporânea. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL REPRESENTAR BRASIL, 2., 2013, São Paulo. Anais... São Paulo: USP/ FAPESP/ NAWEB, 2013. p. 523-536.

SANDERSON, Penelope M.; FISCHER, Carolanne. Exploratory sequential data analysis: foundations. In: ACM SIGCHI Bulletin, 9., 1994. p. 251-317.

SCALI, Silvia; SHILLITO, Ann Marie; WRIGHT, Mark. Thinking in space: concept physical models and the call for new digital tools. *Revista Crafts in the 20th century*, Edinburgh, 2002. Disponível em: <<http://www.eca.ac.uk/tacitus/papers.htm>>. Acesso em: 23 mai. 2016.

SCHLUETER, Arno; THESSELING, Frank. *Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages*. *Automation in Construction*, n.18, p. 153 – 163, Mar, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580508001064>>. Acesso em: 25 fev. 2016

SCHODEK, Daniel; BECHTHOLD, Martin; GRIGGS, James Kimo; KAO, Kenneth; STEINBERG Marco. *Digital Design and Manufacturing: CAD/CAM Applications in Architecture and Design*. New Jersey: John Willey & Sons, 2005.

SCHÖN, Donald Alan. *Educando o profissional reflexivo: um novo design para o ensino e a aprendizagem*. Tradução: Roberto Cataldo Costa. Porto Alegre: ArtMed, 2000.

SCHUBERT, Gerhard; SCHATTEL, David; TÖNNIS, Marcus; GUDRUN, Klinker; PETZOLD, Frank. Tangible mixed reality on-site: interactive augmented visualisations from architectural working models in urban design. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN FUTURES – CAAD Futures, 16., 2015, São Paulo: Springer, 2015. p. 57-74.

SHEDROFF, Nathan. Information interaction design: A unified Field theory of design. In: JACOBSEN, R. Information Design. Cambridge: MIT Press, 1999. p. 267-292.

SIMON, Herbert Alexander. The Sciences of the Artificial. 3 ed. Cambridge: MIT Press, 1996.

SOUSA, Robson Pequeno de; MOITA, Filomena M. C. da S. C.; CARVALHO, Ana Beatriz Gomes. Tecnologias Digitais na Educação. Campina Grande: EDUEPB, 2011.

SOUZA, Clarisse S. de; LEITE, Jair Cavalcanti; PRATES, Raquel Oliveira; BARBOSA, Simone D. J. Interação humano-computador: perspectivas cognitivas e semióticas. In: Fukus, H. (Org.) Anais das Jornadas de Atualização em Informática. Rio de Janeiro: Edições Entre Lugar, 1999. p. 420-470.

STAIB, Gerald; DÖRRHÖFER, Andreas; ROSENTHAL Markus. Components and Systems: modular construction design, structure, new technologies. Berlin: Walter de Gruyter, 2008.

STINY, George. Kindergarten grammars: designing with Froebel's building gifts. Environment and Planning B. London, v. 7, 1980. p. 409-462.

STRAND, Richard K.; PEDERSEN, Curtins O.; CRAWLEY, Drury B. Modularization and simulation techniques for heat balance based energy and load calculation programs: the experience of the ASHRAE Loads Toolkit and Energyplus. Building Simulation, Seventh International IBPSA Conference. Rio de Janeiro, 2001. p. 43-50.

STRUNGE, Jon Wedersoe; RADGIVENDE, Soren Jensen. Building performance simulation in architectural design. In: ADVANCED BUILDING SKINS CONFERENCE, 12., 2017, Bern, Switzerland. **Anais eletrônicos...** Bern: Advanced Buildin Skins GmbH, 2017. Disponível em: < <http://en.sj.dk/media/2517/building-performance-simulation-in-arcitectural-design.pdf> >. Acesso em: 26 out 2017.

TAGLIARI, Ana; FLORIO, Wilson. Fabricação digital de maquetes para análise de projetos não-construídos utilizando a cortadora a laser. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL – SIGRADI, 16., 2012, Fortaleza. Anais... Fortaleza: Forma (in)formação, 2012. p. 530-533.

TAGLIARI, Ana; FLORIO, Wilson. Modelos físicos na prática de projeto de edifícios: uma experiência didática. Revista Projetar - projetos e percepção do ambiente, Natal, v. 2, n. 2, 2017. p. 13-26.

TERZIDIS, K. Algorithmic Architecture. Oxford: Elsevier, 2009.

TIERNEY, T. Abstract Space: beneath the media surface. Oxon: Taylor & Francis, 2007.

WARREN, Peter. Integral Building Performance Assessment. Technical Synthesis Report, IEA - International Energy Agency e ECBCS - Energy Conservation in Building and Community Systems Programe. Annex 32. Publicado por Faber Maunsell Ltd., 2003.

VIEIRA, Jucélia, K.; LARCHER, José V. M.; FERNEDA, Monica C.; JÚNIOR, Gilson D. B. Dias; BRUM, Laura S. Uso de maquetes físicas tridimensionais para o ensino – aprendizagem em desenho técnico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA – COBENGE, 39., 2011, Blumenau. Anais... Blumenau: Odorizzi, 2011.

YU, M. L. *Skins, Envelopes, and Enclosures: concepts for designing building exteriors*. New York: Routledge, 2014.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO INICIAL APLICADO AOS PARTICIPANTES DO EXPERIMENTO

QUESTIONÁRIO DE PESQUISA – TESE DE DOUTORADO
DESEMPENHO ENERGÉTICO EM ETAPAS INICIAIS DE PROJETO
ARQ. VIRGÍNIA CZARNOBAY VANNINI

- 1- Idade _____
- 2- Semestre que está cursando _____
- 3- Utiliza **maquetes físicas como ferramenta de exploração da forma** em etapas iniciais de projeto (conceituação e estudos preliminares)?
() nunca () pouco () frequentemente () sempre
- 4- Utiliza **ferramentas computacionais (softwares)** para explorar a forma em etapas iniciais de projeto?
() sim () não

Caso a resposta seja sim, responda as duas questões abaixo:

4a - Quais softwares você utiliza nas etapas iniciais?

4b- Os softwares são utilizados para avaliar o desempenho da edificação?

- () sim () não

Caso a resposta seja sim, assinale os itens que você avalia:

- () insolação () iluminação () acústica () consumo ar condic. () ventilação
() outros. Quais? _____

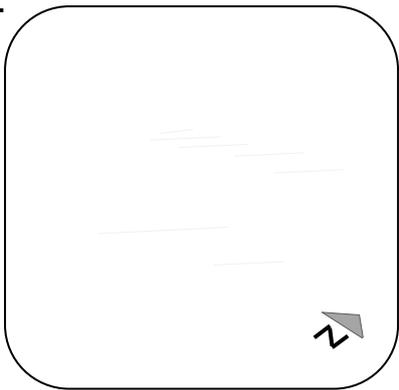
APÊNDICE B – GABARITO FORNECIDO PARA AOS PARTICIPANTES DO EXERCÍCIO

GABARITO DO EXERCÍCIO – TESE DE DOUTORADO DESEMPENHO ENERGÉTICO EM ETAPAS INICIAIS DE PROJETO ARQ. VIRGÍNIA CZARNOBAY VANNINI

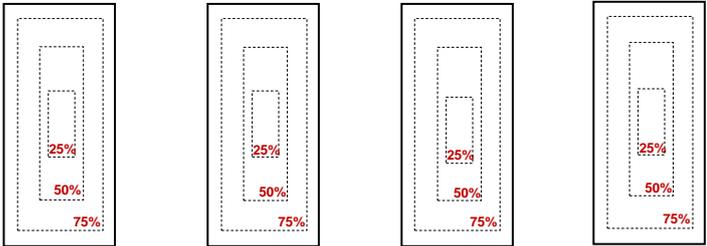
Sempre que julgar uma solução em potencial, durante o processo de manipulação, você deve esboçar a forma e, ao lado, definir a porcentagem de aberturas que essa solução em potencial tem. Você pode desenhar e preencher o gabarito abaixo sempre que julgar necessário.

Exemplo:

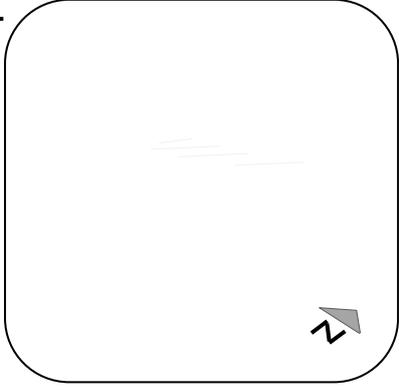
VOLUMETRIA (esboço) **FENESTRAÇÕES (%)**

1.  **Fachada Norte** **Fachada Sul** **Fachada Leste** **Fachada Oeste**

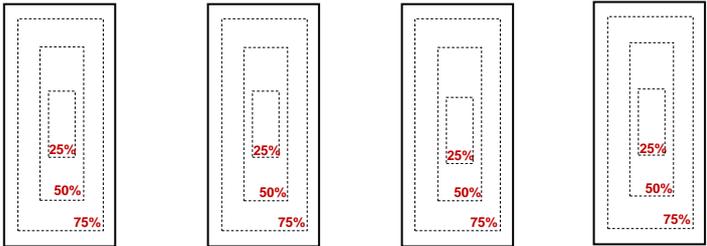
() 0% () 25% () 0% () 25% () 0% () 25% () 0% () 25%
(x) 50% () 75% () 50% (x) 75% () 50% (x) 75% (x) 50% () 75%



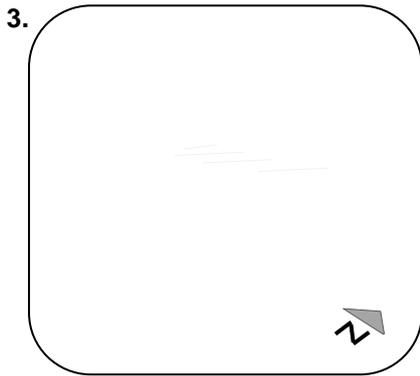
Desempenho: MWh

2.  **Fachada Norte** **Fachada Sul** **Fachada Leste** **Fachada Oeste**

() 0% () 25% () 0% () 25% () 0% () 25% () 0% () 25%
() 50% () 75% () 50% () 75% () 50% () 75% () 50% () 75%



Desempenho: MWh



Desempenho: MWh

Fachada Norte
 0% 25%
 50% 75%



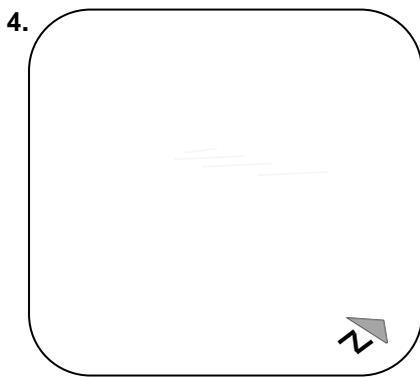
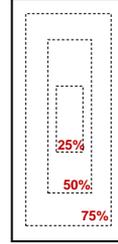
Fachada Sul
 0% 25%
 50% 75%



Fachada Leste
 0% 25%
 50% 75%

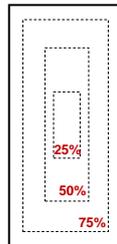


Fachada Oeste
 0% 25%
 50% 75%



Desempenho: MWh

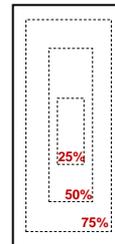
Fachada Norte
 0% 25%
 50% 75%



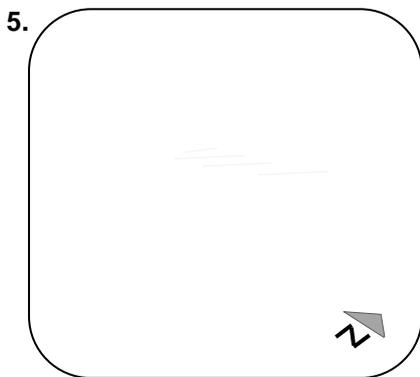
Fachada Sul
 0% 25%
 50% 75%



Fachada Leste
 0% 25%
 50% 75%

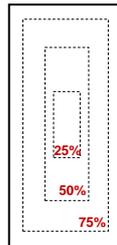


Fachada Oeste
 0% 25%
 50% 75%

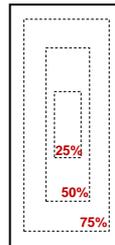


Desempenho: MWh

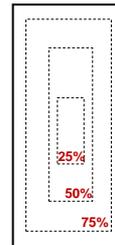
Fachada Norte
 0% 25%
 50% 75%



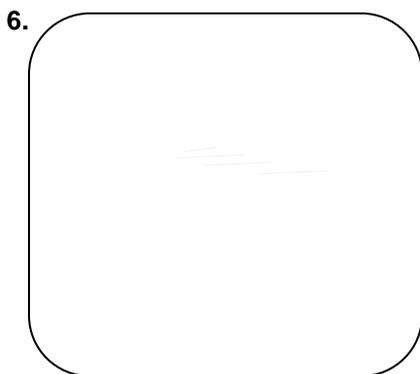
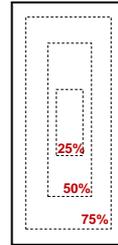
Fachada Sul
 0% 25%
 50% 75%



Fachada Leste
 0% 25%
 50% 75%



Fachada Oeste
 0% 25%
 50% 75%



Desempenho: MWh

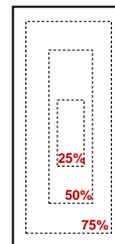
Fachada Norte
 0% 25%
 50% 75%



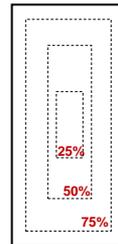
Fachada Sul
 0% 25%
 50% 75%

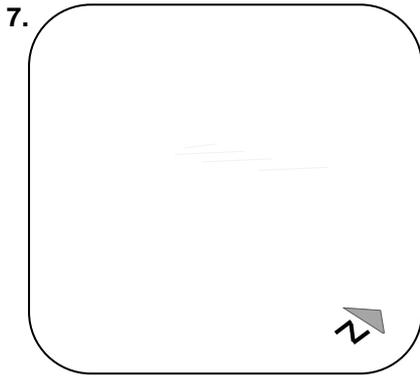


Fachada Leste
 0% 25%
 50% 75%



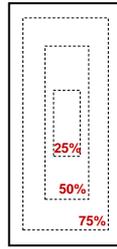
Fachada Oeste
 0% 25%
 50% 75%





Desempenho: MWh

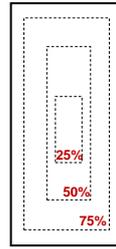
Fachada Norte
() 0% () 25%
() 50% () 75%



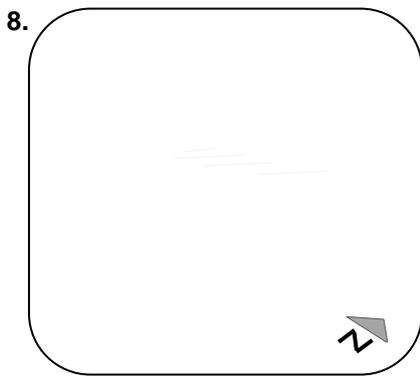
Fachada Sul
() 0% () 25%
() 50% () 75%



Fachada Leste
() 0% () 25%
() 50% () 75%



Fachada Oeste
() 0% () 25%
() 50% () 75%



Desempenho: MWh

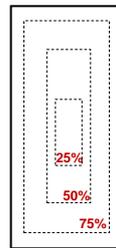
Fachada Norte
() 0% () 25%
() 50% () 75%



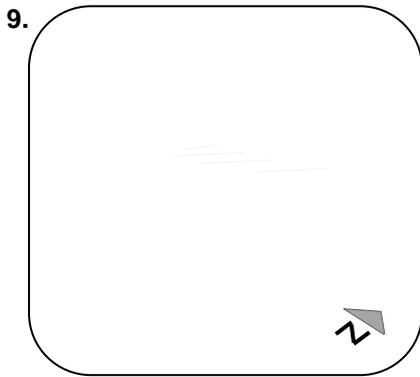
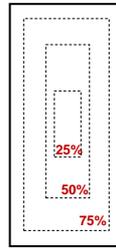
Fachada Sul
() 0% () 25%
() 50% () 75%



Fachada Leste
() 0% () 25%
() 50% () 75%

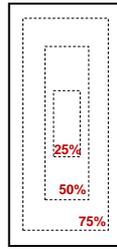


Fachada Oeste
() 0% () 25%
() 50% () 75%

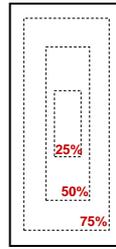


Desempenho: MWh

Fachada Norte
() 0% () 25%
() 50% () 75%



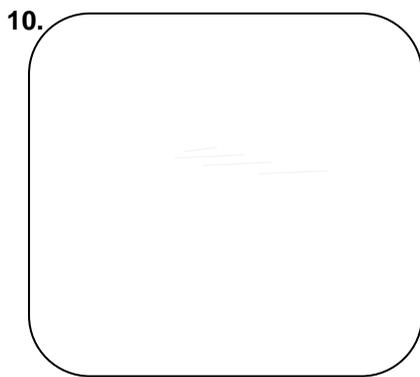
Fachada Sul
() 0% () 25%
() 50% () 75%



Fachada Leste
() 0% () 25%
() 50% () 75%

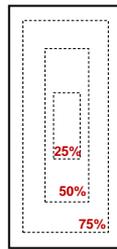


Fachada Oeste
() 0% () 25%
() 50% () 75%

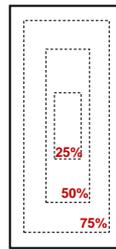


Desempenho: MWh

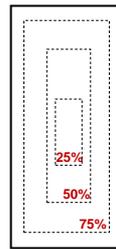
Fachada Norte
() 0% () 25%
() 50% () 75%



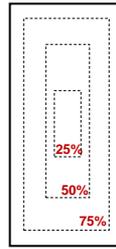
Fachada Sul
() 0% () 25%
() 50% () 75%

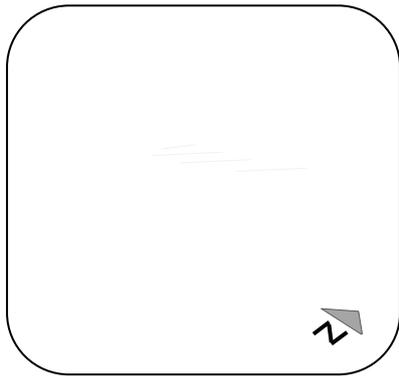


Fachada Leste
() 0% () 25%
() 50% () 75%



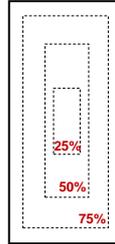
Fachada Oeste
() 0% () 25%
() 50% () 75%



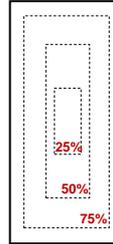


Desempenho: MWh

Fachada Norte
() 0% () 25%
() 50% () 75%



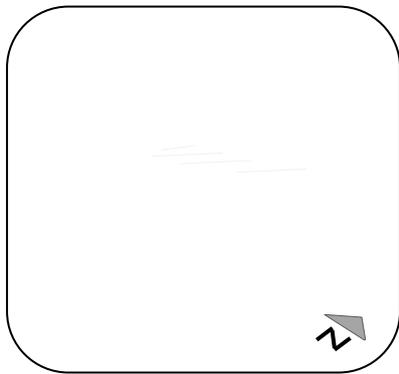
Fachada Sul
() 0% () 25%
() 50% () 75%



Fachada Leste
() 0% () 25%
() 50% () 75%

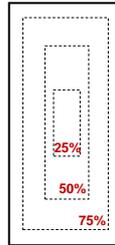


Fachada Oeste
() 0% () 25%
() 50% () 75%



Desempenho: MWh

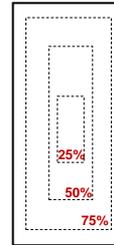
Fachada Norte
() 0% () 25%
() 50% () 75%



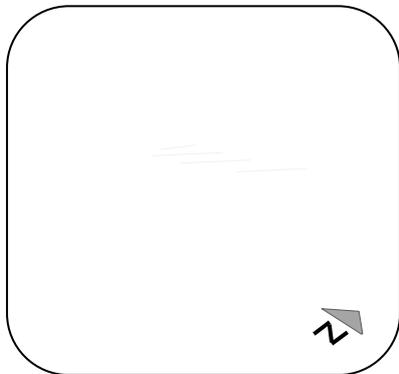
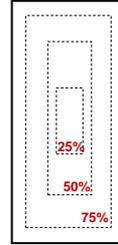
Fachada Sul
() 0% () 25%
() 50% () 75%



Fachada Leste
() 0% () 25%
() 50% () 75%

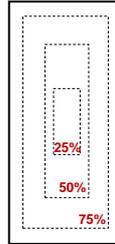


Fachada Oeste
() 0% () 25%
() 50% () 75%

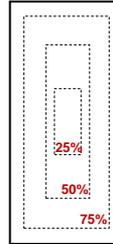


Desempenho: MWh

Fachada Norte
() 0% () 25%
() 50% () 75%



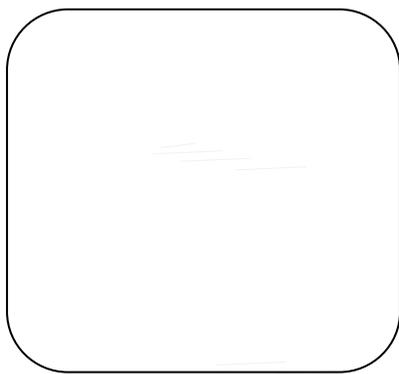
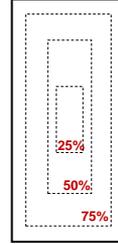
Fachada Sul
() 0% () 25%
() 50% () 75%



Fachada Leste
() 0% () 25%
() 50% () 75%

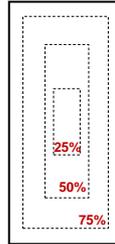


Fachada Oeste
() 0% () 25%
() 50% () 75%

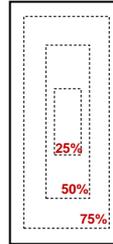


Desempenho: MWh

Fachada Norte
() 0% () 25%
() 50% () 75%



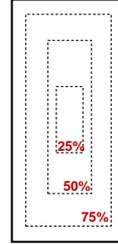
Fachada Sul
() 0% () 25%
() 50% () 75%



Fachada Leste
() 0% () 25%
() 50% () 75%



Fachada Oeste
() 0% () 25%
() 50% () 75%



APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO FINAL APLICADO AOS PARTICIPANTES DO EXPERIMENTO

QUESTIONÁRIO DE PESQUISA – TESE DE DOUTORADO DESEMPENHO ENERGÉTICO EM ETAPAS INICIAIS DE PROJETO ARQ. VIRGÍNIA CZARNOBAY VANNINI

1- O ambiente de projeto ajudou você encontrar soluções para o problema proposto?

() sim () não

2- Utilizaria o ambiente proposto em seus projetos?

() sim () não

Por quê? _____

3- O que você alteraria ou adicionaria para melhorar a ferramenta utilizada?

4- Conhece outro método ou ferramenta mais eficaz para a tomada de decisões em etapas iniciais de projeto?

APÊNDICE D – TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE ESCLARECIDO

– TESE DE DOUTORADO –

DESEMPENHO ENERGÉTICO EM ETAPAS INICIAIS DE PROJETO

ARQ. VIRGÍNIA CZARNOBAY VANNINI

Você está sendo convidado(a) como voluntário(a) a participar da pesquisa que tem como tema o uso de objetos físicos associados a modelos de desempenho como elementos qualificadores do processo de projeto. O objetivo do estudo é avaliar o processo de tomada de decisões de projeto, voltadas para minimizar o consumo de energia de edificações comerciais, e como pode contribuir para a sistematização do conhecimento.

As atividades de projeto desenvolvidas nesta pesquisa consistem em desenhar e manipular formas de um modelo reduzido, visando à coleta de dados para a avaliação do comportamento da curva de aprendizagem durante a utilização de um ambiente de projeto que antecipa a avaliação do desempenho energético. Os dados serão gravados com o software de captura de tela Screenshot Captor, visando o registro sequencial das ações desenvolvidas pelo participante ao longo do experimento. O grupo de participantes é constituído por graduando em arquitetura e urbanismo do 6º ao 10º semestre da Faculdade de Arquitetura da UFRGS e serão avaliados individualmente no Laboratório Simmlab – Laboratório para Simulação e Modelagem em Arquitetura e Urbanismo.

Ao assinar esse termo, estou ciente de que minha privacidade será respeitada, ou seja, meu nome ou qualquer outro dado ou elemento que possa, de qualquer forma, identificar-me, será mantido em sigilo. A pesquisadora se responsabiliza pela guarda e confidencialidade dos dados durante todas as fases da pesquisa.

É assegurada a assistência durante toda pesquisa, bem como me é garantido o livre acesso a todas as informações e esclarecimentos adicionais sobre o estudo e suas consequências, enfim, tudo o que eu queira saber antes, durante e depois da minha participação. Também fui informado de que posso me recusar a participar do estudo, ou retirar meu consentimento a qualquer momento, sem precisar justificar, e de, por desejar sair da pesquisa, não sofrerei qualquer prejuízo.

A pesquisadora envolvida com o referido projeto é a Arquiteta e Mestre em Arquitetura, Virgínia Czarnobay Vannini, aluna de doutorado do PROPAR – Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, orientada pelo Prof PhD Benamy Turkienicz e com eles, poderei manter contato pelos telefones (51) 3308-3906 (54) 99965-8707.

Se você pensa que a pesquisa não está sendo realizada da forma como você imaginou ou que está sendo prejudicado de alguma forma, você pode entrar em contato com o Comitê de Ética em Pesquisa da UFRGS pelo telefone (51)3308-5698 (Rua Ramiro Barcelos, 2600 – Porto Alegre/RS).

Declaro que li e entendi todas as informações presentes neste Termo de Consentimento Livre e Esclarecido; e tive a oportunidade de discutir as informações deste termo. Todas as minhas perguntas foram respondidas e eu estou satisfeito com as respostas. Entendo que receberei uma via assinada e datada deste documento e que outra via assinada e datada será arquivada pela pesquisadora responsável do estudo. Enfim, tendo sido orientado quanto ao teor de todo o aqui mencionado e compreendido a natureza e o objetivo do já referido estudo, manifesto meu livre consentimento em participar, estando totalmente ciente de que não há nenhum valor econômico, a receber ou a pagar, por minha participação.

Dados do participante da pesquisa	
Nome:	
Telefone:	
e-mail:	

Porto Alegre, _____ de _____ de _____.

Assinatura do participante da pesquisa

Arq. Virgínia Czarnobay Vannini - Pesquisadora

USO DE IMAGEM

Autorizo o uso de minha imagem e áudio, através de registro digital e físico, gerados para fins da pesquisa, sendo seu uso restrito a vídeo, imagens digitais e fotografias.

Assinatura do participante da pesquisa

Arq. Virgínia Czarnobay Vannini - Pesquisadora

APÊNDICE E – JUSTIFICATIVA PARA A ESCOLHA DE SOLUÇÃO EM POTENCIAL PARA PARTIDO ARQUITETÔNICO

Participante A: "Optei por continuar com a opção 2, por acreditar que este partido está mais bem disposto no lote, levando em conta sua orientação. Além disso, as fenestrações também estão distribuídas de acordo. Por isso escolhi esta simulação mesmo sendo o segundo melhor valor."

Participante B: "Eu escolhi a última opção que vem a ser também a que tem melhor desempenho, isso porque com o programa eu pude desenvolver um raciocínio sobre as fachadas e sua eficiência, ou seja, ao longo das variações volumétricas eu realmente tentei buscar a que proporcionaria o menor valor. O que eu pensei para chegar à forma final foi imaginar que através dela seria possível que uma fachada sombreasse parte da outra, aumentando a eficiência, e também, possibilitando que mesmo com grandes aberturas na fachada norte, o número obtido fosse menor. Também pensei que na fachada que pega o sol pela manhã, ou seja, a leste, as aberturas fossem em maior quantidade (área), do que na oeste, porque na minha percepção o sol da manhã é mais saudável, especialmente no inverno. Por essas combinações de razões escolhi a última alternativa."

Participante C: "Mesmo não sendo a opção mais eficiente creio que a geometria permitiria a utilização de técnica não mecânica como ventilação cruzada, algo que reduziria o gasto com ar condicionado."

Participante D: "Tendo em vista que a alternativa 10 foi a de menor consumo energético eu utilizaria sua geometria de base para o lançamento do partido e alteraria algumas coisas, como as aberturas para a fachada norte que neste modelo são só 25% da área da fachada. Seria possível aumentar a área dessas aberturas contando com sistemas de proteção solar, como películas, brises ou outros tipos de vedações móveis ou fixas."

Participante E: "Considerando a posição geográfica (maior parte da fachada voltada para o norte) e a espessura da barra – que garante uma ventilação cruzada. Acredito que seja a melhor opção. Além do contato mínimo entre barras que considero favorável para a circulação."

Participante F: "A solução que eu daria continuidade é a 8, a última. É a que tem um consumo mais baixo, e a geometria tem bastante jogo para gerar um prédio interessante, porque gera um nível intermediário que pode virar um terraço ou alguma coisa assim. Eu decidi orientar o prédio na direção norte-sul, tendo as áreas de fachada maiores nessas orientações. Desse modo, dá-se uma ventilação cruzada, e nesse sentido que tem como máximo 12 metros de distância, pelo tanto ajuda o conforto térmico do prédio. Assim, reduzi as aberturas nas fachadas leste e oeste, porque são as que têm menor área nessa geometria e as que termicamente são mais difícil de controlar. Eu achei interessante também esteticamente a solução 3, mas eu acho melhor a que resolvi finalmente."

Participante G: “Ao pensar na melhor disposição dos volumes em relação ao seu posicionamento, orientação solar, gasto energético e ventilação, escolheria dentre as soluções testadas a de número 3. Que corresponde ao menor gasto de energia com aquecimento e refrigeração e dispõe das melhores disposições de fachada, pois aproveita ao máximo de luz do sol na fachada norte, com 50% de fenestração na relação com a metragem quadrada desta fachada, já as fachadas leste e oeste dispõe de menor relação fachada (m²) por percentual de aberturas, sendo essa relação de 25%, pois o ângulo de incidência do sol nessas fachada não é o mais desejável e por fim, na abertura sul foi onde houve a maior relação, com 75%, em que se pode ter um ótimo aproveitamento de iluminação indireta sem a preocupação da incidência direta do sol.”

Participante H: “Mesmo que a 9 tenha a maior eficiência energética, escolho a 5, pois a diferença no consumo é de 3 MWh, o que não considero tanto, frente à diferença nas aberturas. A 5 tem maior abertura no norte, sendo um partido melhor.”

Participante I: “A solução adotada seria a número 12 por apresentar o melhor desempenho, porém, por possuir poucas aberturas nas fachadas leste e norte, talvez devesse ser feitas algumas alterações no que diz respeito à iluminação natural. Além disso, essa solução possui uma empena cega, na fachada oeste, o que deveria ser analisado mais a fundo também levando em consideração questões como iluminação e ventilação natural.”

Participante J: “Escolhido como modelo de partido, a análise 10, que possui desempenho satisfatório, volumetria interessante e fachada sul predominante em contato com o acesso do lote.”

Participante K: “A forma escolhida para dar continuidade foi a 7, pois além de ela ter obtido menor consumo, considerando as três opções com o consumo menor (5, 6 e 7), ela é que possui um número mais proporcional de abertura entre as fachadas, permitindo uma boa entrada de luz natural em qualquer situação.”

Participante L: “Escolho a 7, pois tem o segundo menor gasto, mas utiliza bastante as aberturas em todas as faces, ao contrário da 5 (a de menor consumo) que cega a fachada sul.”

Participante M: “A escolha da forma se deve por aspectos geométricos que garantem aberturas em todas as orientações, além disso, a forma mais robusta confere maior inércia térmica. Outra justificativa para a escolha dessa forma para um prédio comercial seria a geometria mais simples que resultaria em menores custos para o construtor.”

Participante N: “A volumetria escolhida foi a de número 4, pois possui uma área maior de aberturas e um desempenho térmico bom em relação às outras propostas.”

Participante O: “Opção 9. Entre os menores valores de consumo de energia. Com grande área de fachada para norte, mesmo que com pequena área de abertura.

Grande área de abertura sul, utilizando iluminação natural indireta. Se comparada ao melhor resultado de eficiência, possui uma estratégica formal, um pouco mais atraente.”

Participante P: “Apesar da forma mais eficiente ser a mais monótona, escolheria ela para tomar como partido, pois a diferença de consumo foi considerável. Talvez fizesse mais teste para tentar encontrar uma forma com o mínimo de dinamismo e eficiência semelhante ou trabalharia acima da forma regular para através de outros aspectos (sem ser volumetria), gerar estímulo para o edifício.”

Participante Q: “Geometria escolhida: 11 Geometria com o menor consumo de energia (33,3 MW-h), mas mantendo a maior porcentagem de fenestrações na fachada leste e a maior área de fachada na orientação norte.”

Participante R: “O modelo escolhido foi o 8, com a fachada leste em 75° de abertura, pois ela teria um grande potencial de luz natural e com um dos menores desempenhos.”

Participante S: “ O modelo com menor desempenho energético foi o 13 (32,51 MW-h), porém optaria pelo modelo 11 (38,23 MW-h) porque as fachadas são mais uniformes permeáveis. Acredito que para um edifício de uso comercial-de trabalho é importante garantir luz natural e vistas para os usuários que permanecerão longos períodos de tempo no interior.”

Participante T: “A partir das teses identifiquei que a forma de número 10 obteve o melhor desempenho, no entanto, selecionei a forma número 15, pois além de obter um desempenho interessante, possui uma composição que permite a criação de um pátio aberto entre os dois edifícios, condicionando as aberturas das janelas. Com as aberturas voltadas para o interior do pátio (fachadas leste e sul), além de obter-se uma vista atraente do pátio através da janela e uma conexão visual entre os dois edifícios, é possível captar uma boa iluminação com aberturas grandes voltadas para sul sem prejudicar a eficiência energética do edifício.”

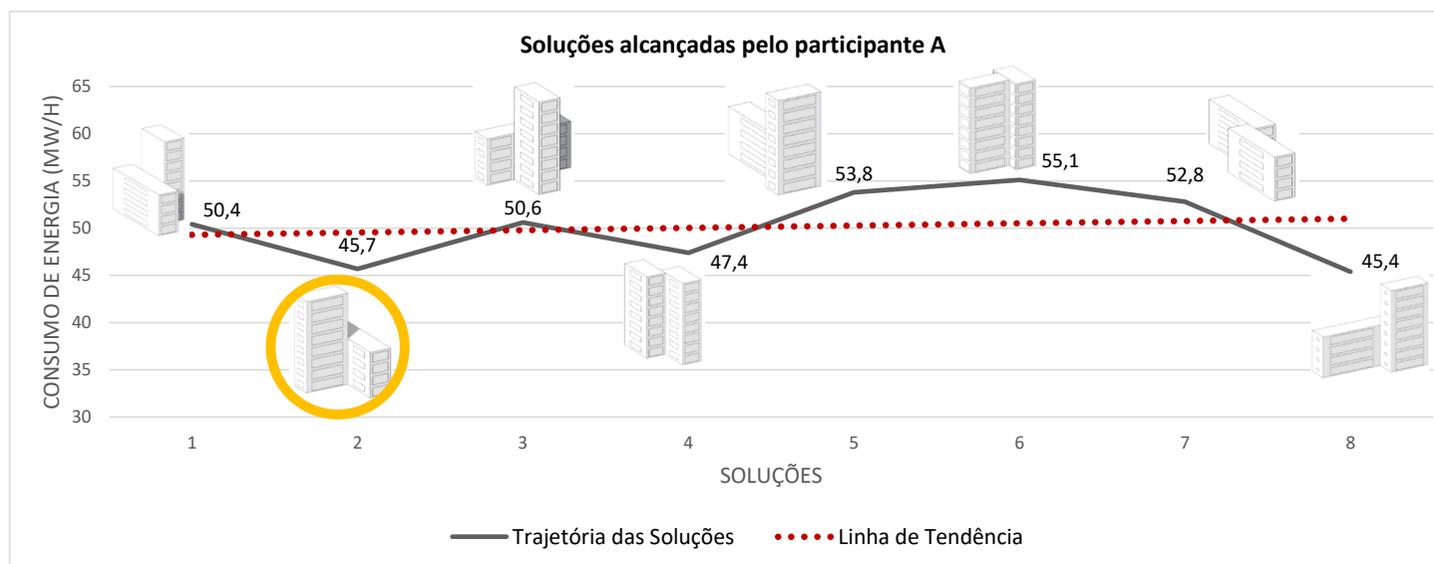
Participante U: “Opção 11. Apesar de não ser a mais eficiente (40, 9), ainda possui um valor bom, comparado as outras. A forma, possui proporções interessantes além de possibilitar mais opções para ventilação cruzada que algumas das opções de consumo mais baixo. Por se tratar de edifício comercial, acredito ser interessante existir uma leve variedade de volumetria, para conferir variação e flexibilidade de uso. Recuo de frente suficiente para provocar e não próximo demais de lado a causar sensação de “L” ou de encontro de planos. Além de possibilitar uso dos fundos acolhido pela barra horizontal.”

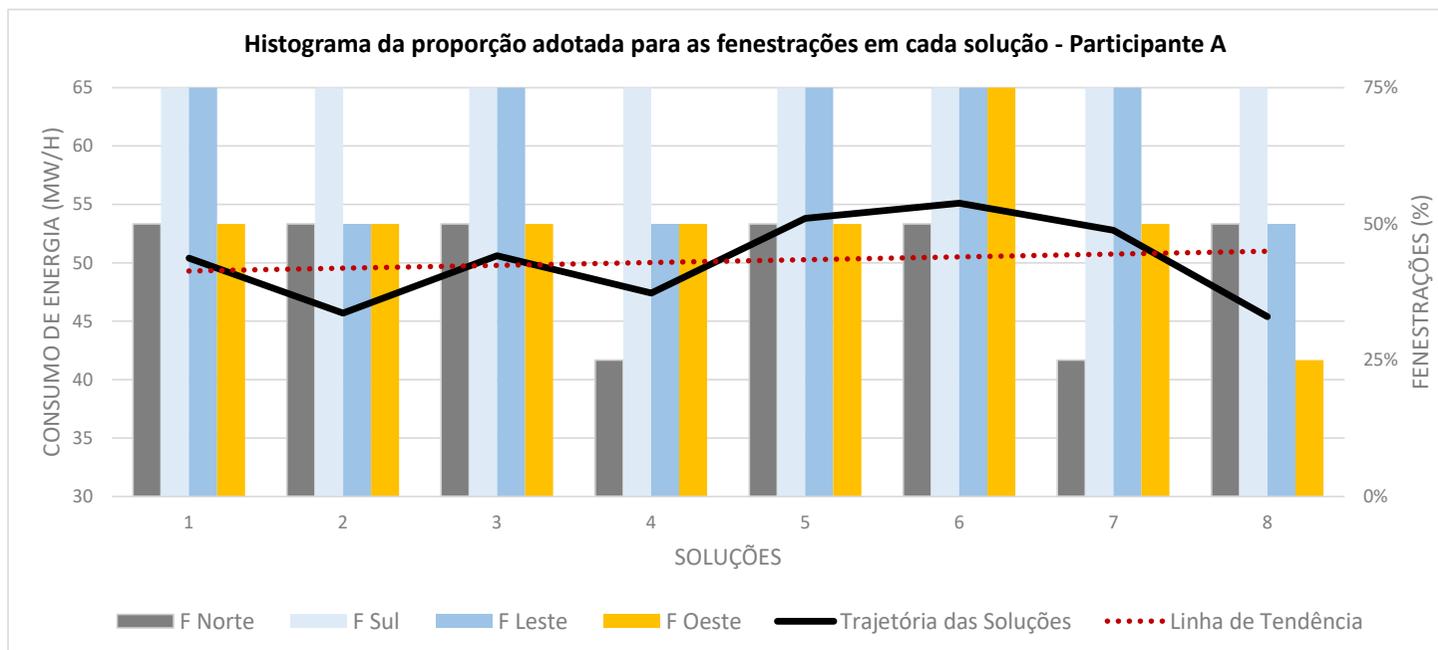
APÊNDICE F – TABULAÇÃO DOS DADOS GERAIS DA AMOSTRA

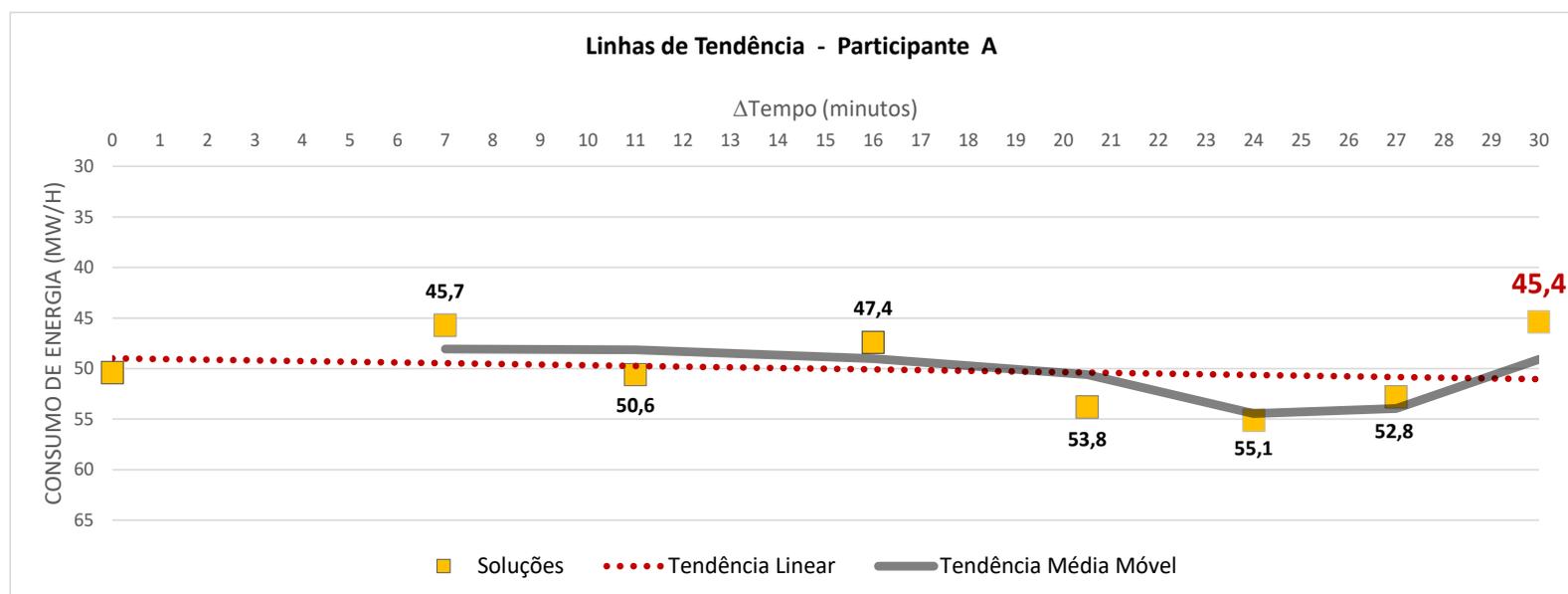
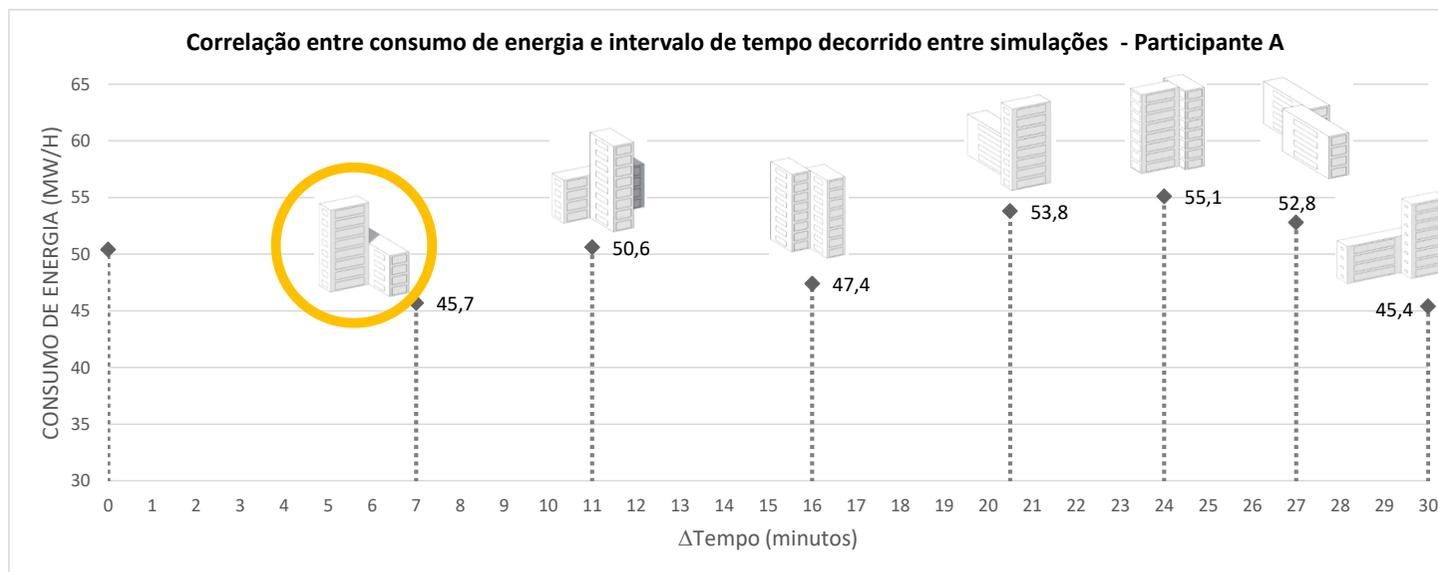
Participante A

Participante A 25anos 9º semestre
 Maquetes em etapas iniciais: pouco Softwares em etapas iniciais: SketchUp e Revit Desempenho em etapas iniciais: insolação

PARÂMETROS	SOLUÇÕES								
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	
Tempo (min.)	0	7,0	11,0	16,0	20,5	24,0	27,0	30,0	
Fenestrações	F Norte	50%	50%	50%	25%	50%	50%	25%	50%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F Leste	75%	50%	75%	50%	75%	75%	75%	50%
	F Oeste	50%	50%	50%	50%	50%	75%	50%	25%
Geometria (pers sudoeste)									
Desempenho (MW/h)	50,4	45,7	50,6	47,4	53,8	55,1	52,8	45,4	



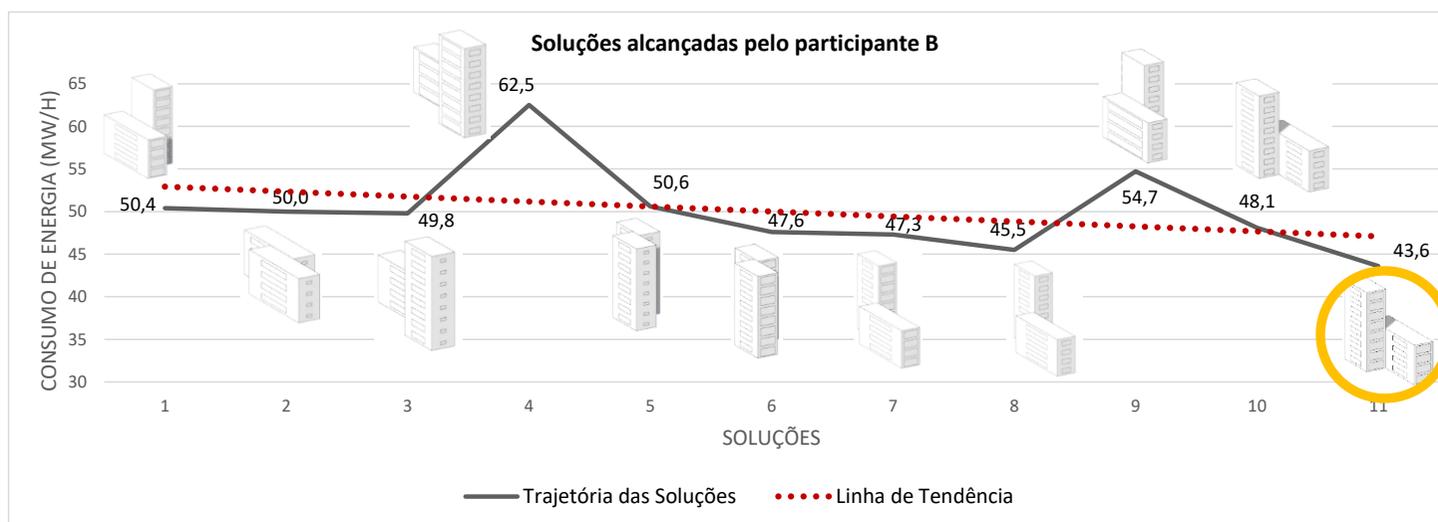


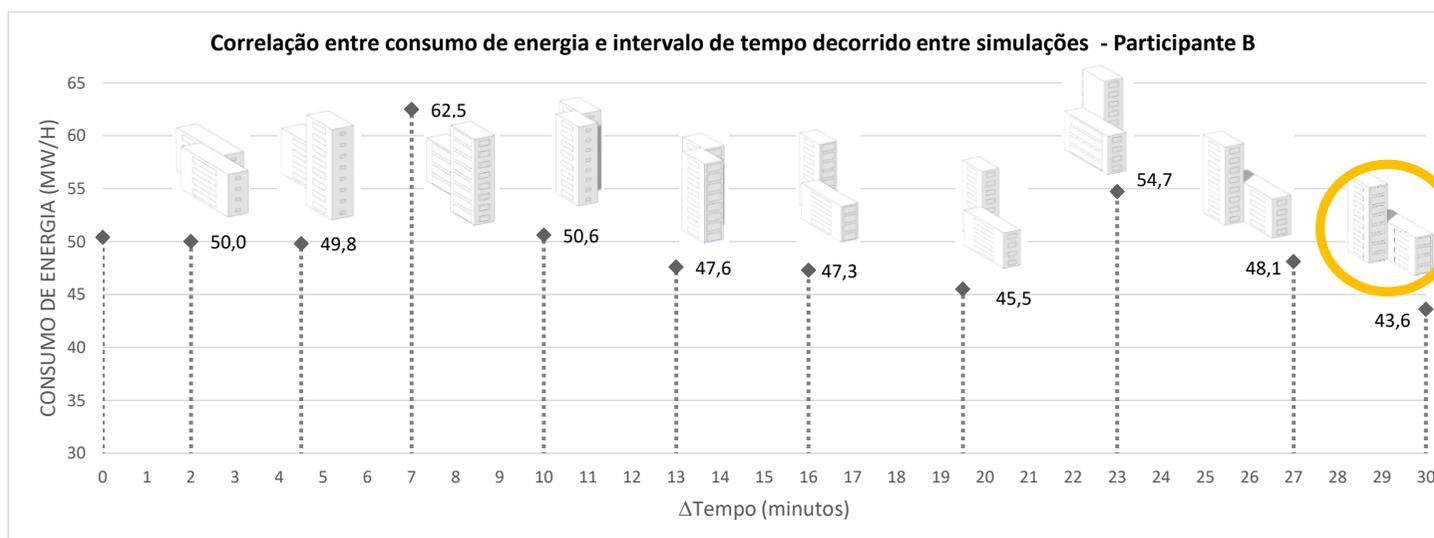
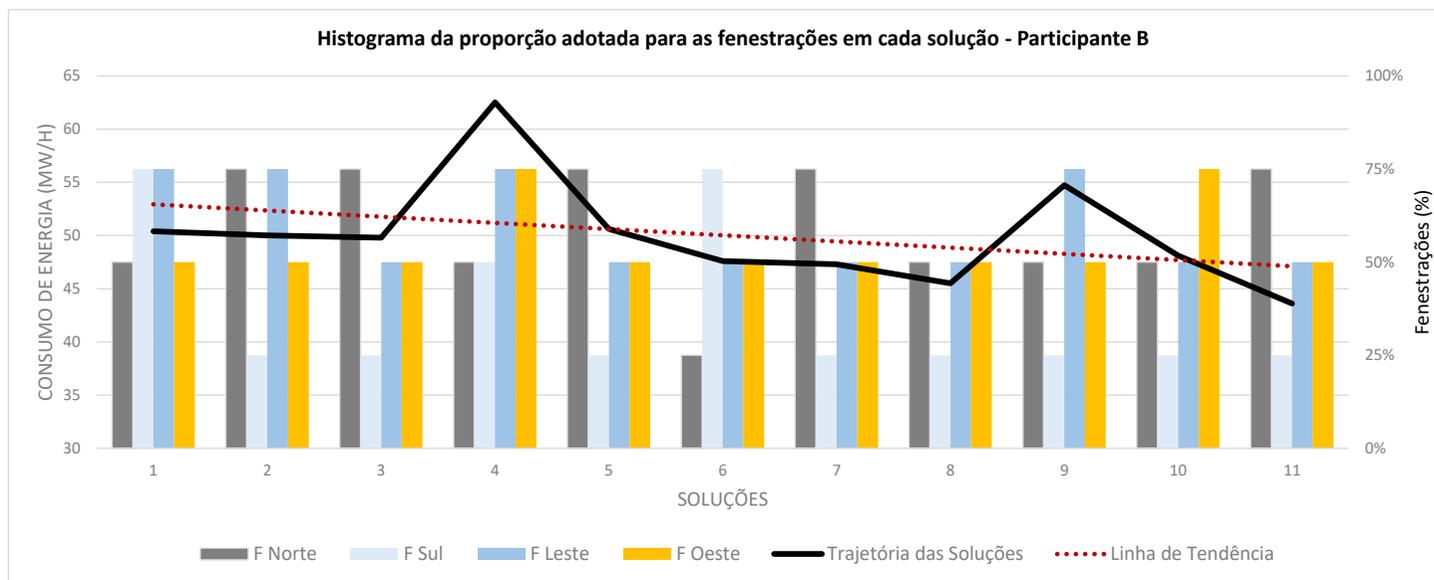


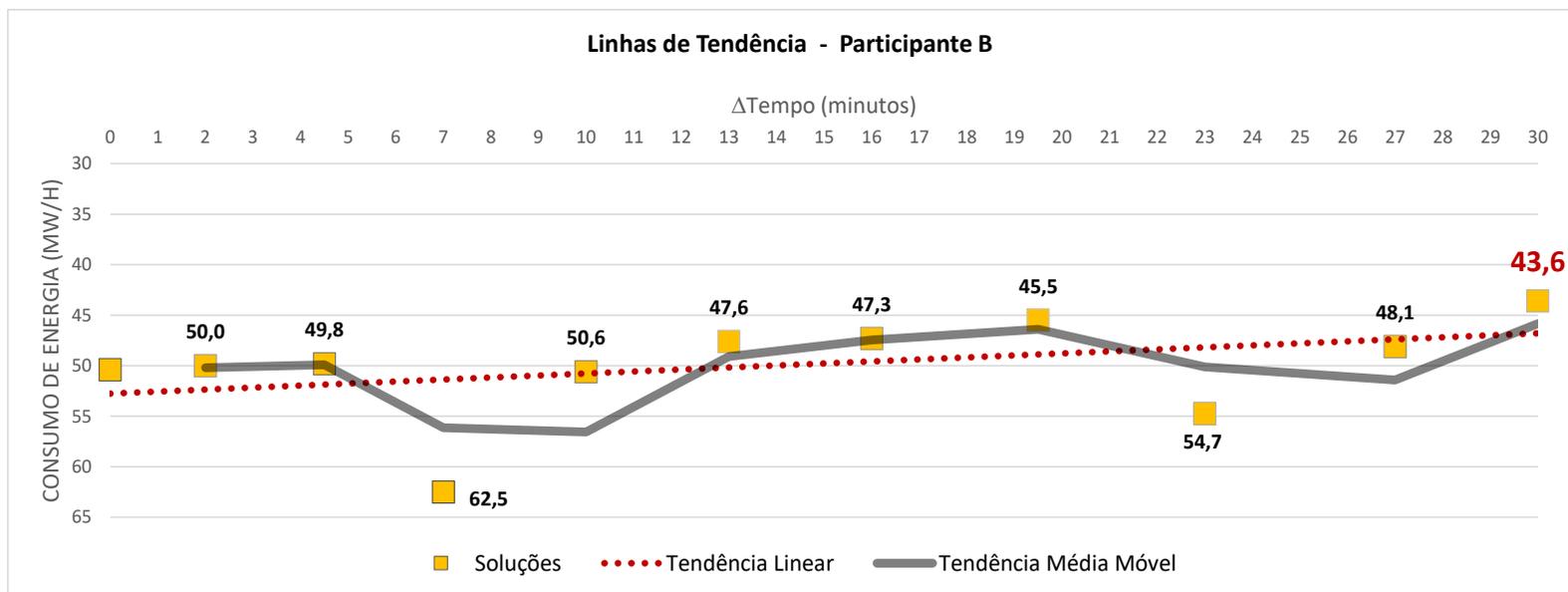
Participante B

Participante B 23anos 10º semestre
 Maquetes em etapas iniciais: frequente Softwares em etapas iniciais: SketchUp e Vectorworks Desempenho em etapas iniciais: não

PARÂMETROS	SOLUÇÕES										
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
Tempo (min.)	0	2,0	4,5	7,0	10,0	13,0	16,0	19,5	23,0	27,0	30,0
Fenestrações	F Norte	50%	75%	75%	50%	75%	25%	75%	50%	50%	75%
	F Sul	75%	25%	25%	50%	25%	75%	25%	25%	25%	25%
	F Leste	75%	75%	50%	75%	50%	50%	50%	50%	75%	50%
	F Oeste	50%	50%	50%	75%	50%	50%	50%	50%	50%	75%
Geometria (pers sudoeste)											
Desempenho (MW/h)	50,4	50,0	49,8	62,5	50,6	47,6	47,3	45,5	54,7	48,1	43,6







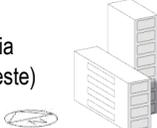
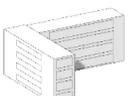
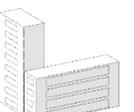
Participante C

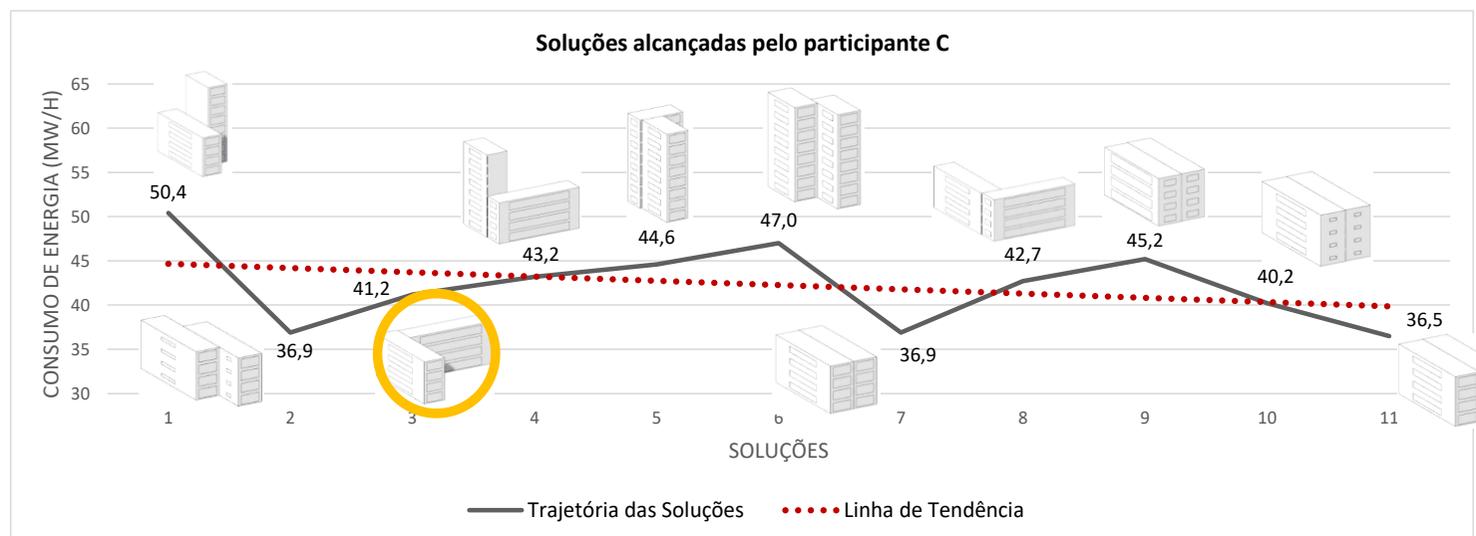
Participante C 22anos 8º semestre

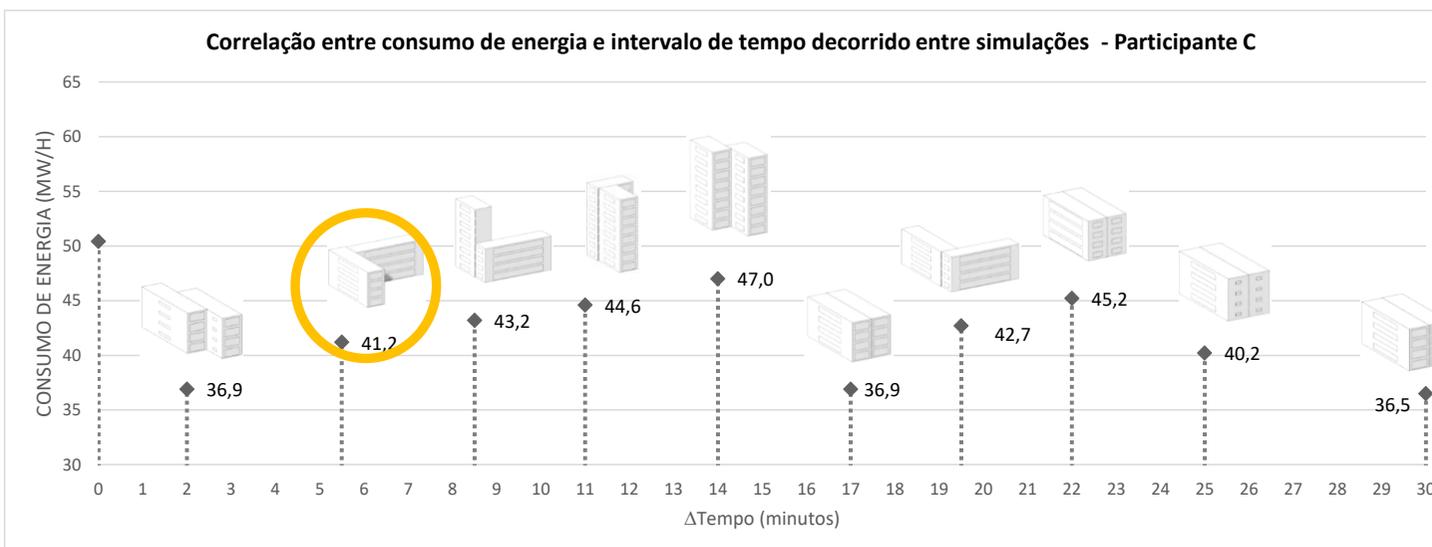
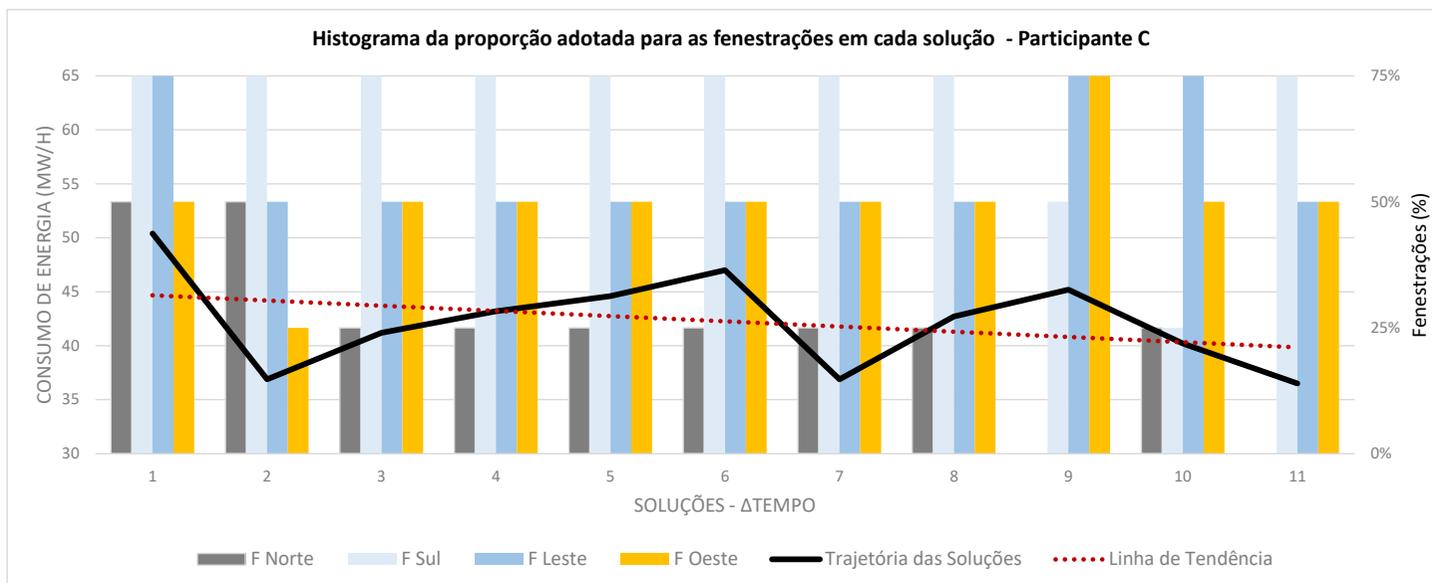
Maquetes em etapas iniciais: pouco

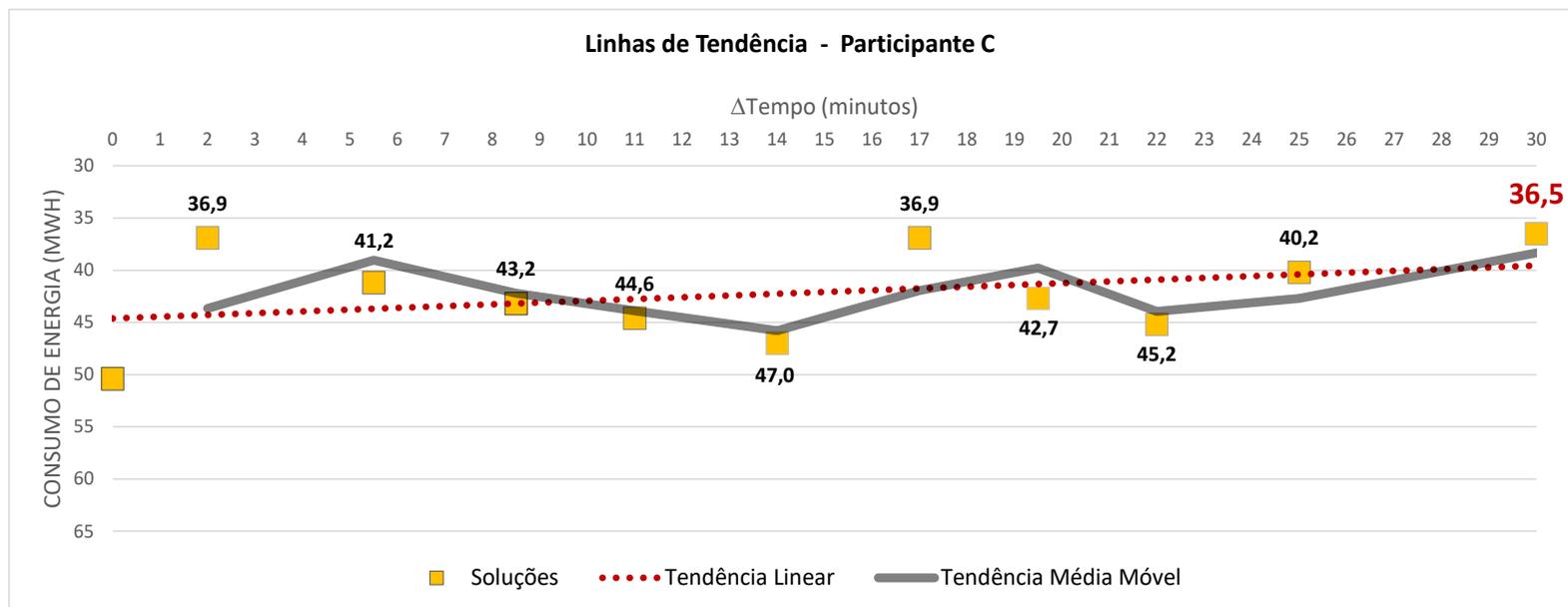
Softwares em etapas iniciais: SketchUp e Rhinoceros/Grasshopper

Desempenho em etapas iniciais: não

PARÂMETROS		SOLUÇÕES										
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
Tempo (min.)		0	2,00	5,50	8,50	11,00	14,00	17,00	19,50	22,00	25,00	30,00
Fenestrações	F Norte	50%	50%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	0%	25%	0%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	50%	25%	75%
	F Leste	75%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	75%	75%	50%
	F Oeste	50%	25%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	75%	50%	50%
Geometria (pers sudoeste)												
Desempenho (MW/h)		50,4	36,9	41,2	43,2	44,6	47,0	36,9	42,7	45,2	40,2	36,5



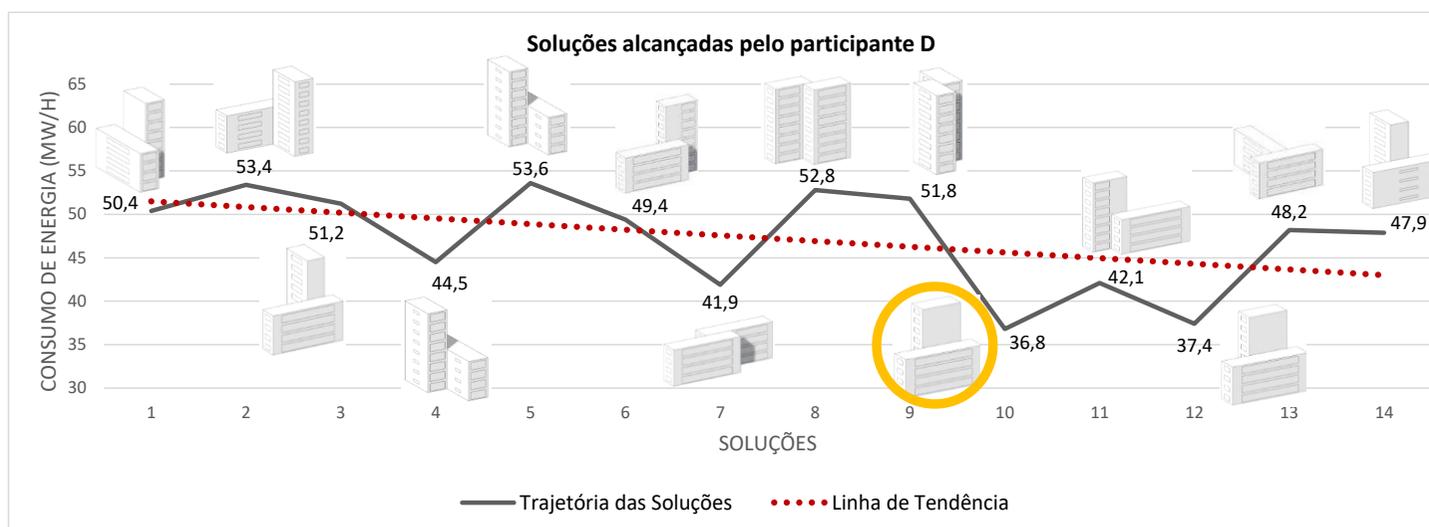


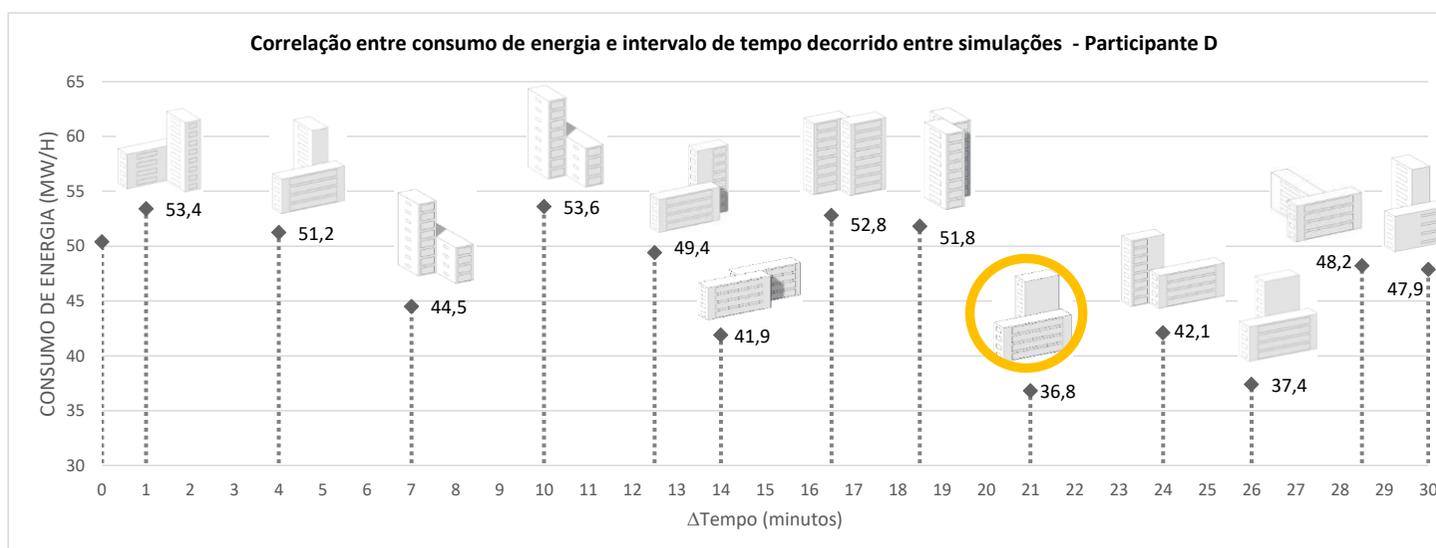
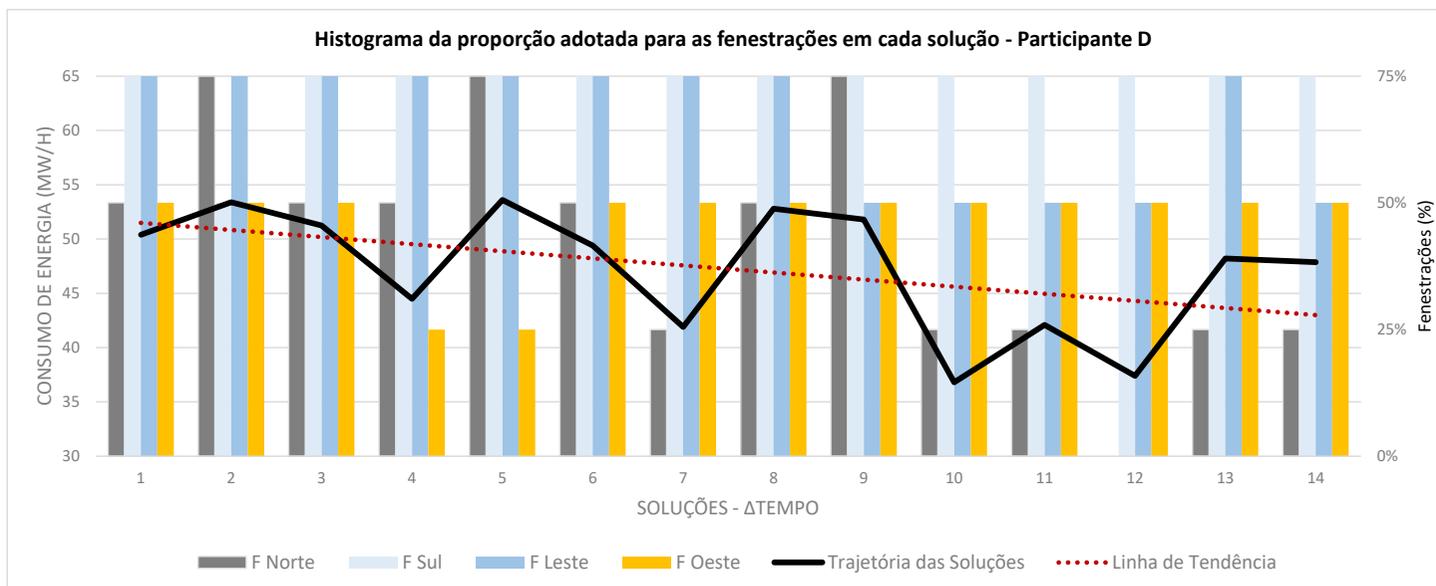


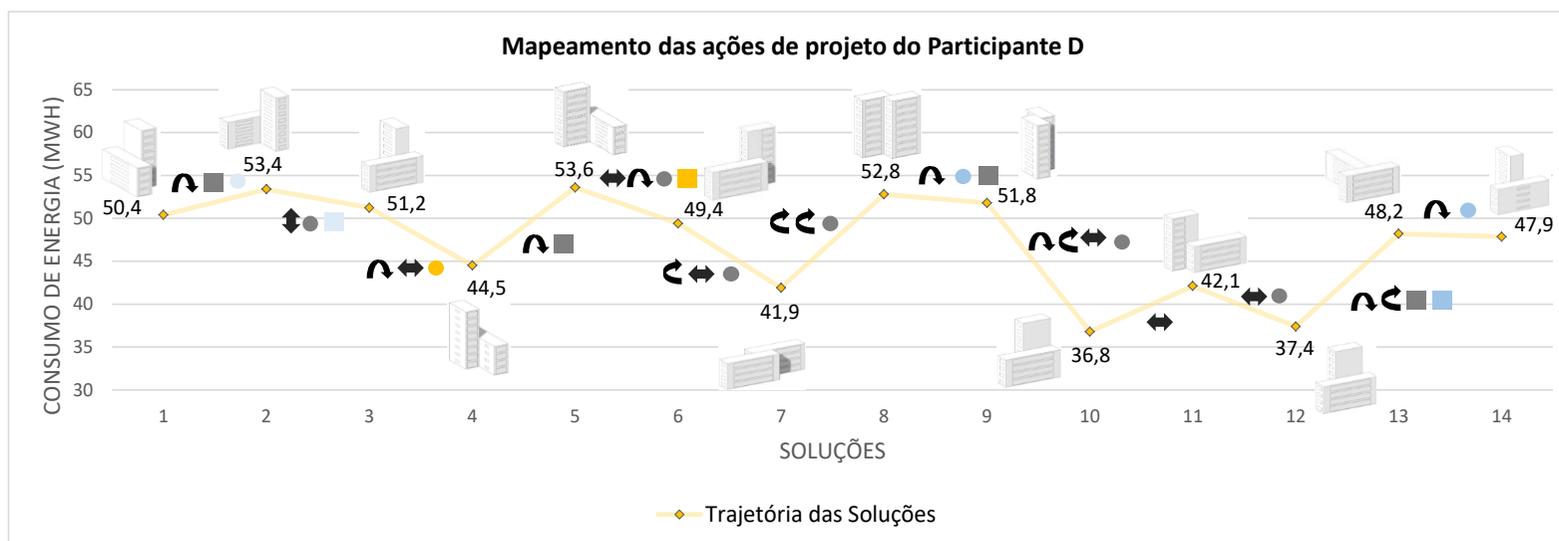
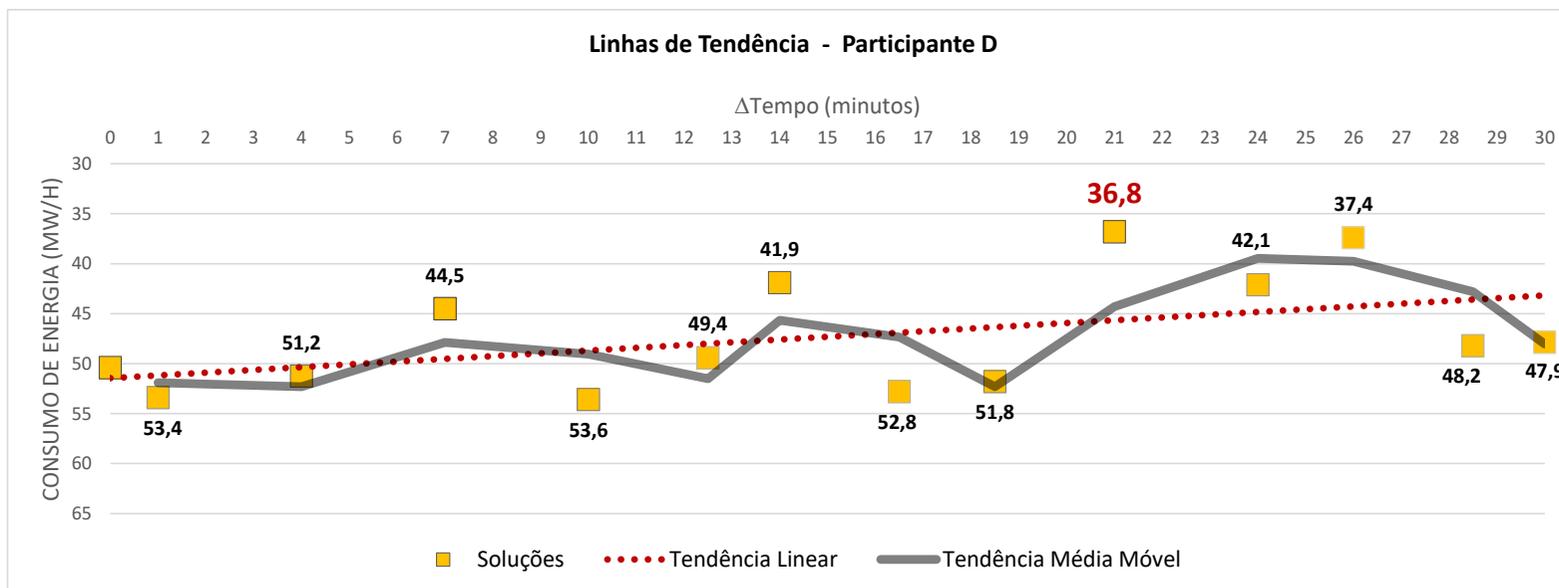
Participante D

Participante D 23anos 7ºsemestre
 Maquetes em etapas iniciais: pouco Softwares em etapas iniciais: SketchUp, Autocad e Archicad Desempenho em etapas iniciais: não

PARÂMETROS	SOLUÇÕES														
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°	
Tempo (min.)	0	1,0	4,0	7,0	10,0	12,5	14,0	16,5	18,5	21,0	24,0	26,0	28,5	30,0	
Fenestraçãoes	F Norte	50%	75%	50%	50%	75%	50%	25%	50%	75%	25%	25%	0%	25%	25%
	F Sul	75%	50%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F Leste	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	50%	50%	50%	50%	75%	50%
	F Oeste	50%	50%	50%	25%	25%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
Geometria (pers sudoeste)															
Desempenho (MWh)	50,4	53,4	51,2	44,5	53,6	49,4	41,9	52,8	51,8	36,8	42,1	37,4	48,2	47,9	

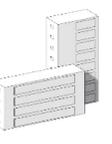
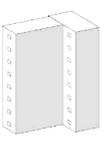
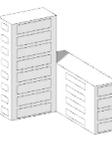
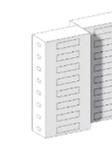
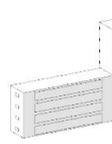
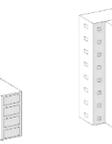
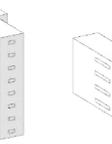


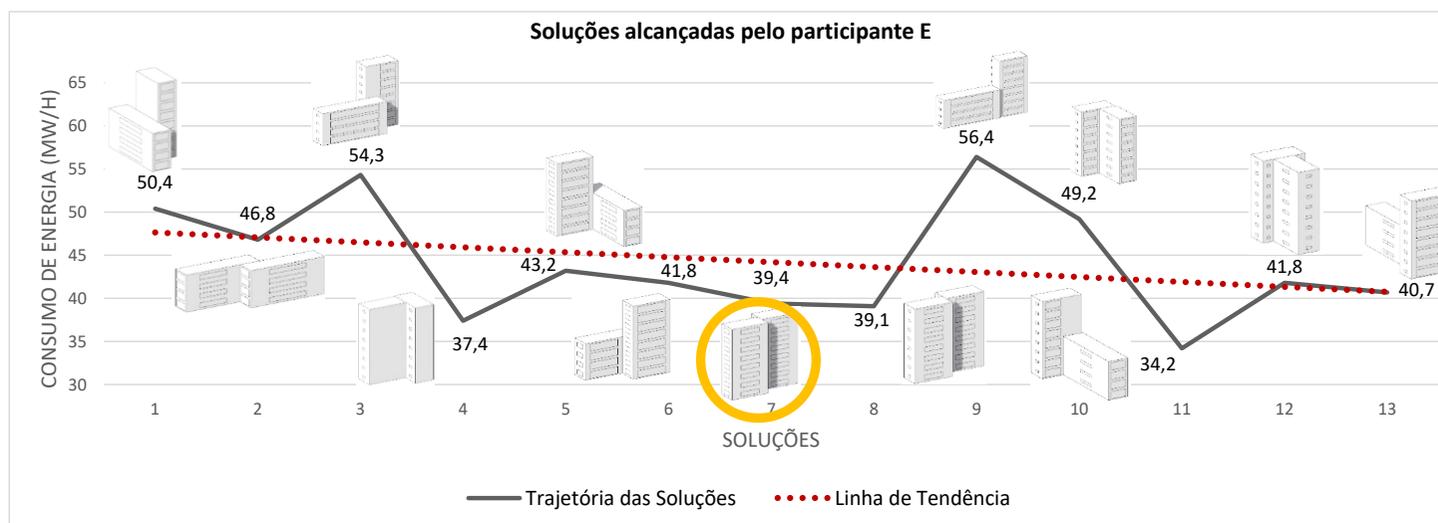


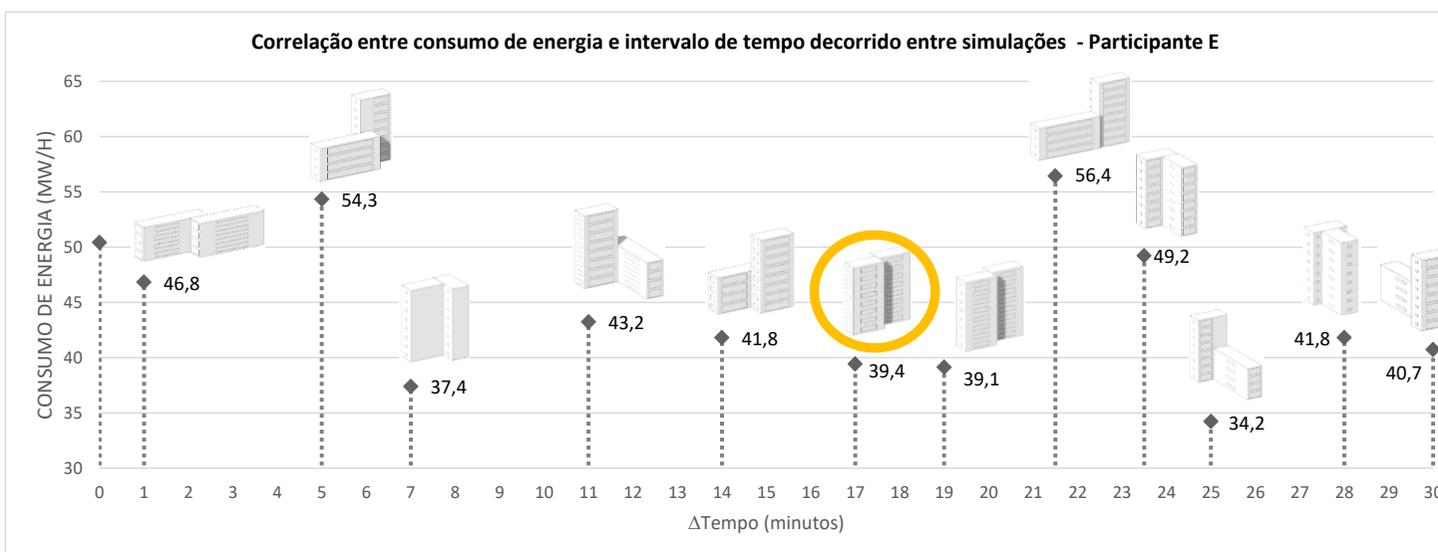
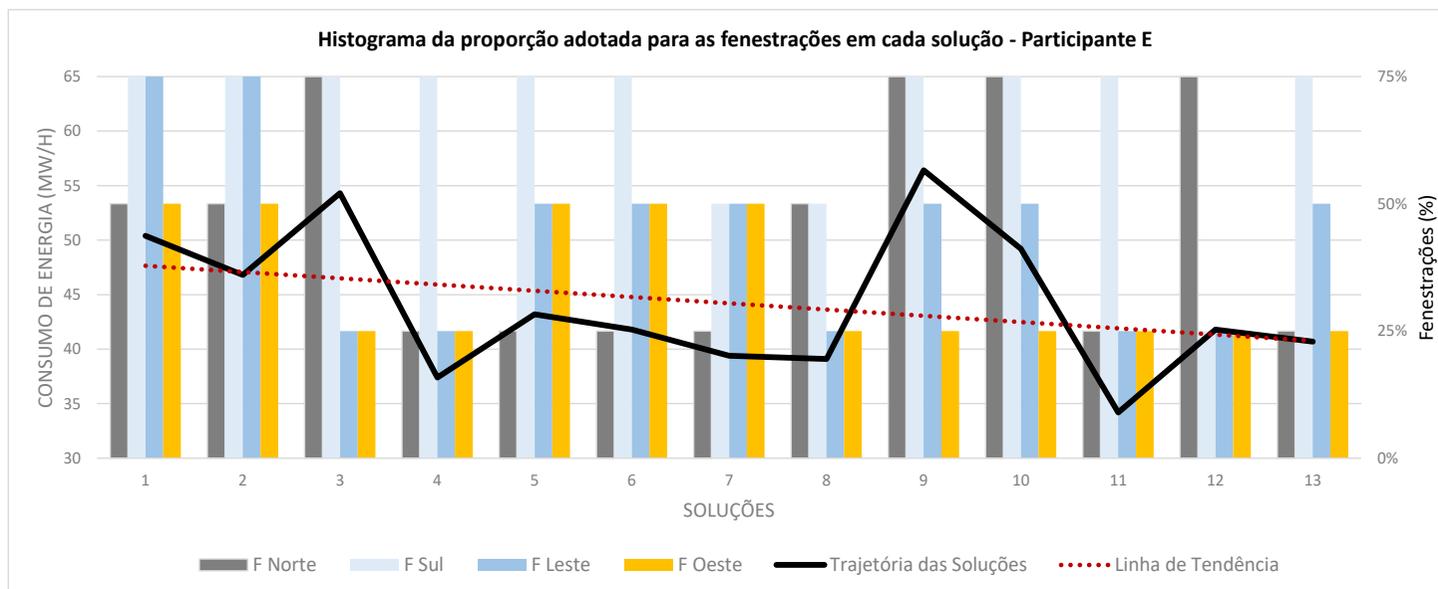


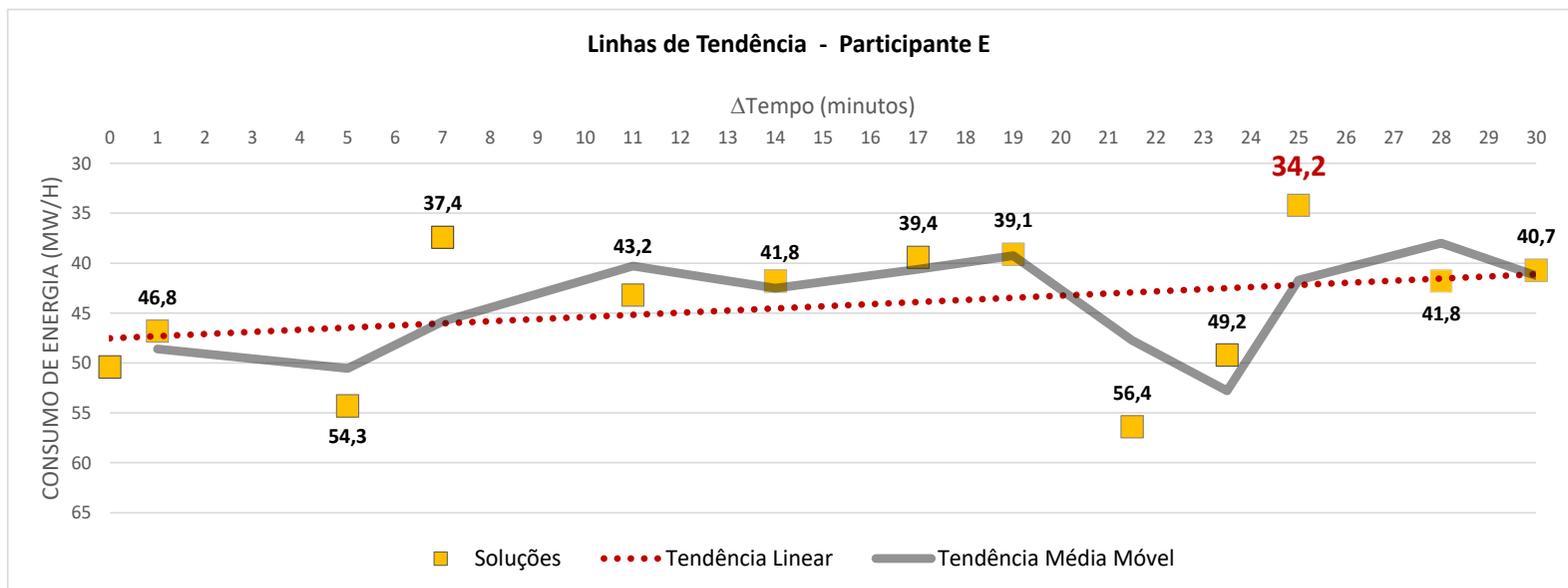
Participante E

Participante E 24anos 7º semestre
 Maquetes em etapas iniciais: pouco Softwares em etapas iniciais: SketchUp e Autocad Desempenho em etapas iniciais: não

PARÂMETROS	SOLUÇÕES													
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	
Tempo (min.)	0	1,00	5,00	7,00	11,00	14,00	17,00	19,00	21,50	23,50	25,00	28,00	30,00	
Fenestraçãoes	F Norte	50%	50%	75%	25%	25%	25%	25%	50%	75%	75%	25%	75%	25%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	75%	50%	50%	75%	75%	75%	25%	75%
	F Leste	75%	75%	25%	25%	50%	50%	50%	25%	50%	50%	25%	25%	50%
	F Oeste	50%	50%	25%	25%	50%	50%	50%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
Geometria (pers sudoeste)														
Desempenho (MW/h)	50,4	46,8	54,3	37,4	43,2	41,8	39,4	39,1	56,4	49,2	34,2	41,8	40,7	



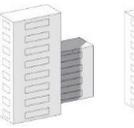
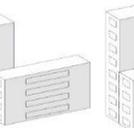
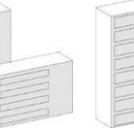
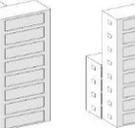
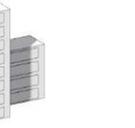


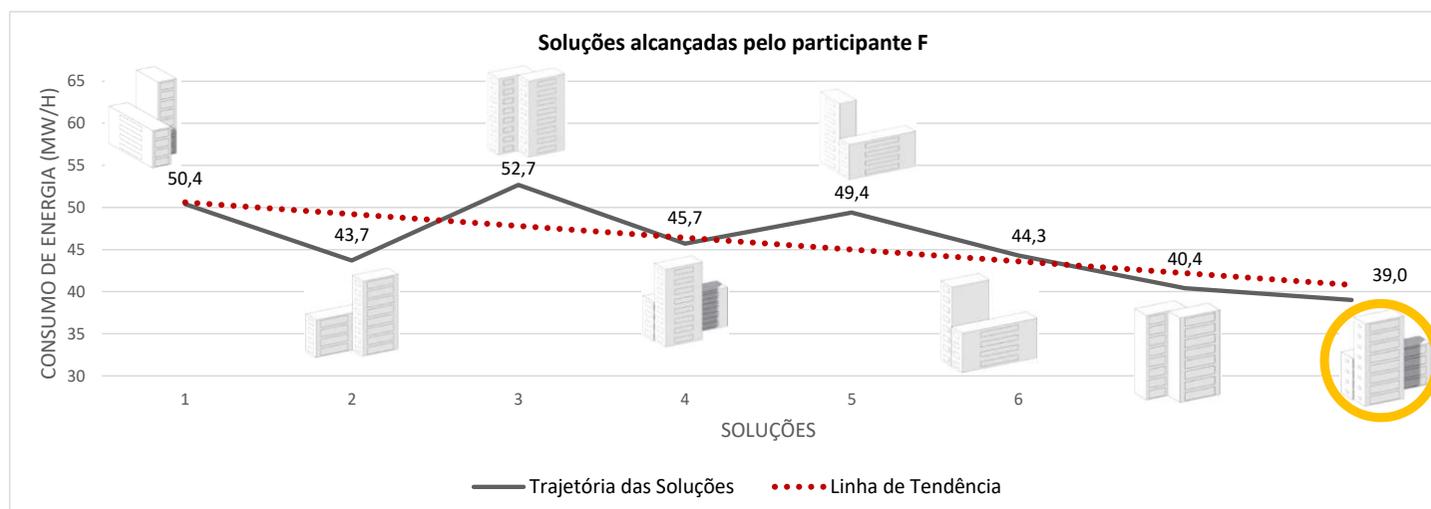


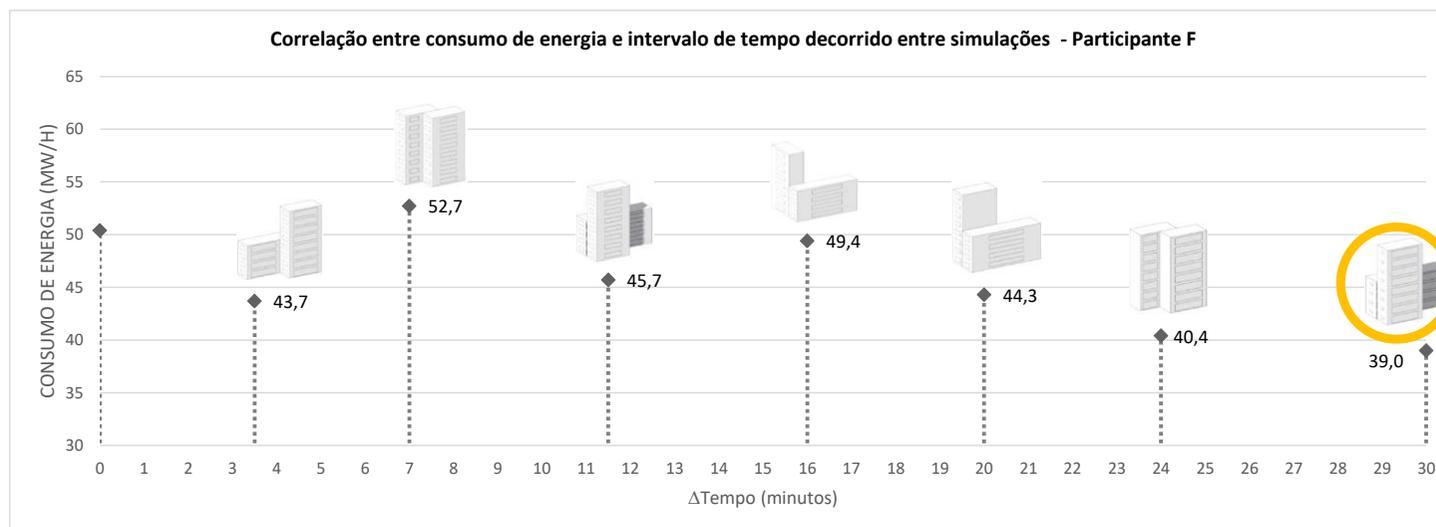
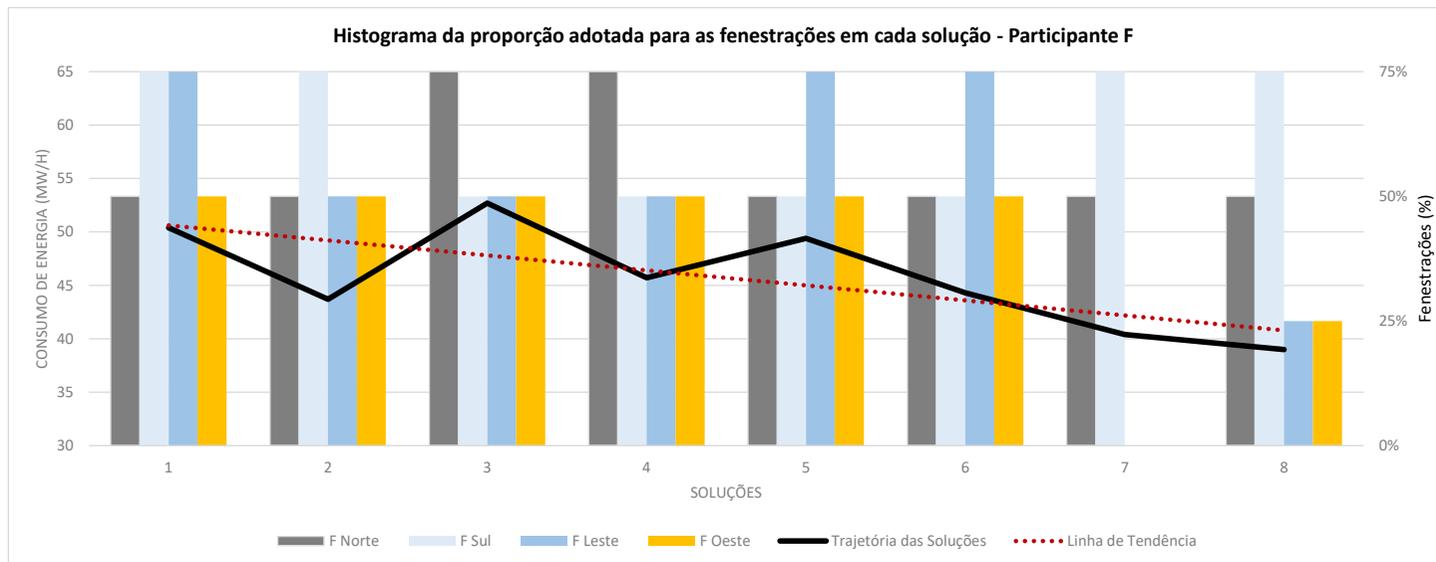
Participante F

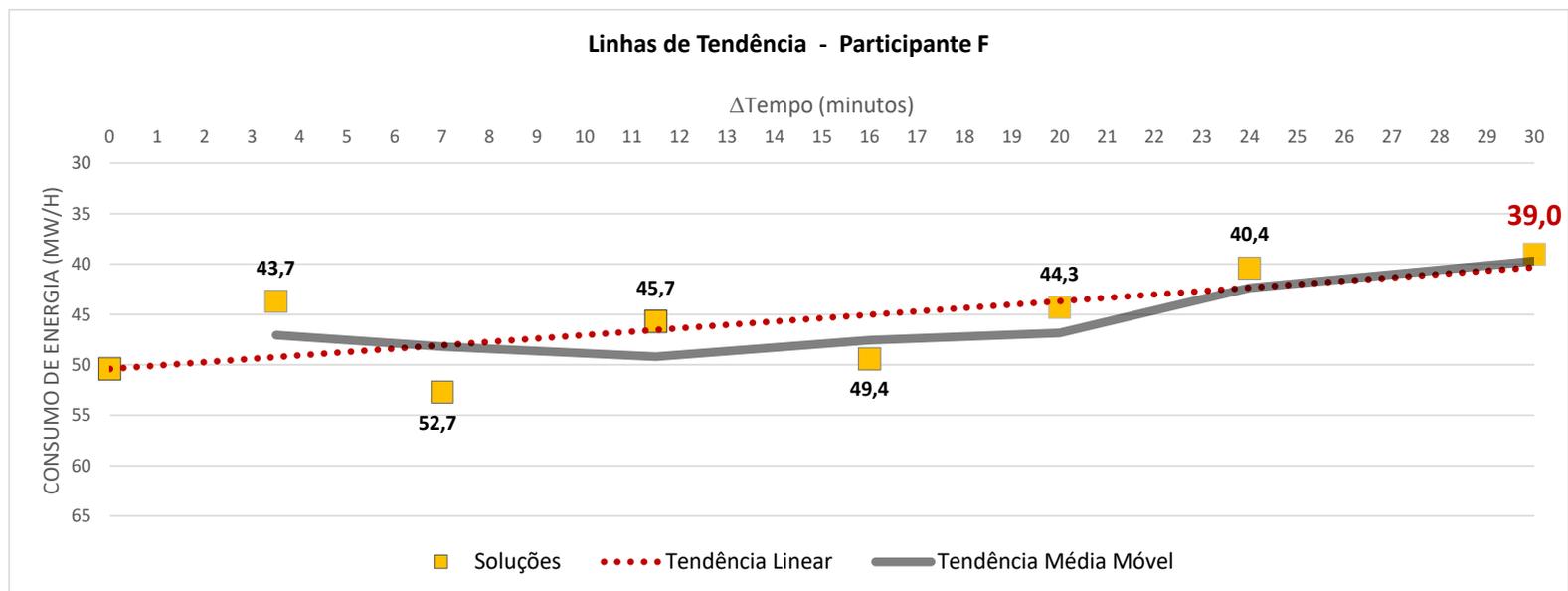
Participante F 23anos 9º semestre

Maquetes em etapas iniciais: freq. Softwares em etapas iniciais: SketchUp e Microstation Desemp. em etapas iniciais: insolação e iluminação

PARÂMETROS	SOLUÇÕES							
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
Tempo (min.)	0	3,50	7,00	11,50	16,00	20,00	24,00	30,00
Fenestrações	F Norte	50%	50%	75%	75%	50%	50%	50%
	F Sul	75%	75%	50%	50%	50%	75%	75%
	F Leste	75%	50%	50%	50%	75%	0%	25%
	F Oeste	50%	50%	50%	50%	50%	0%	25%
Geometria (pers sudoeste)								
Desempenho (MW/h)	50,4	43,7	52,7	45,7	49,4	44,3	40,4	39,0





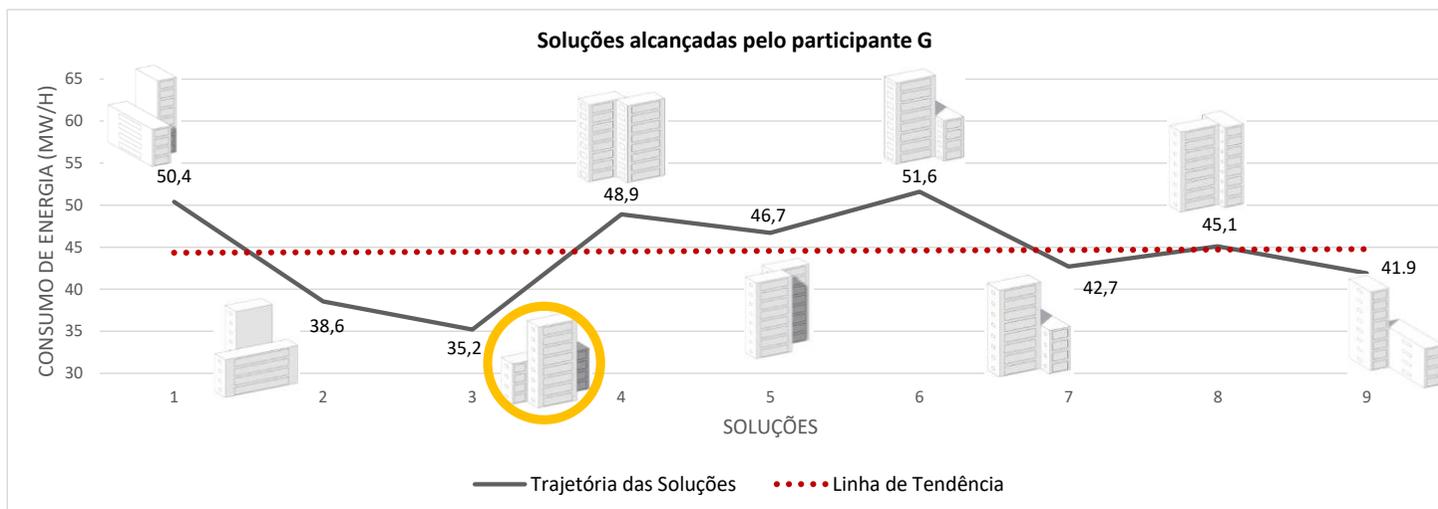


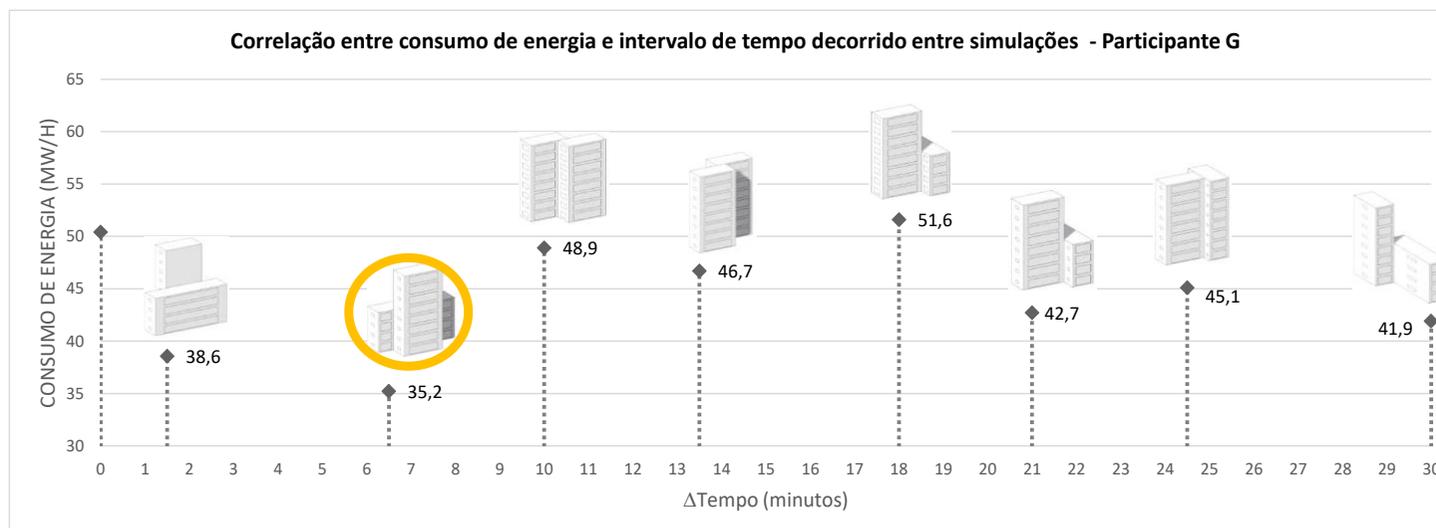
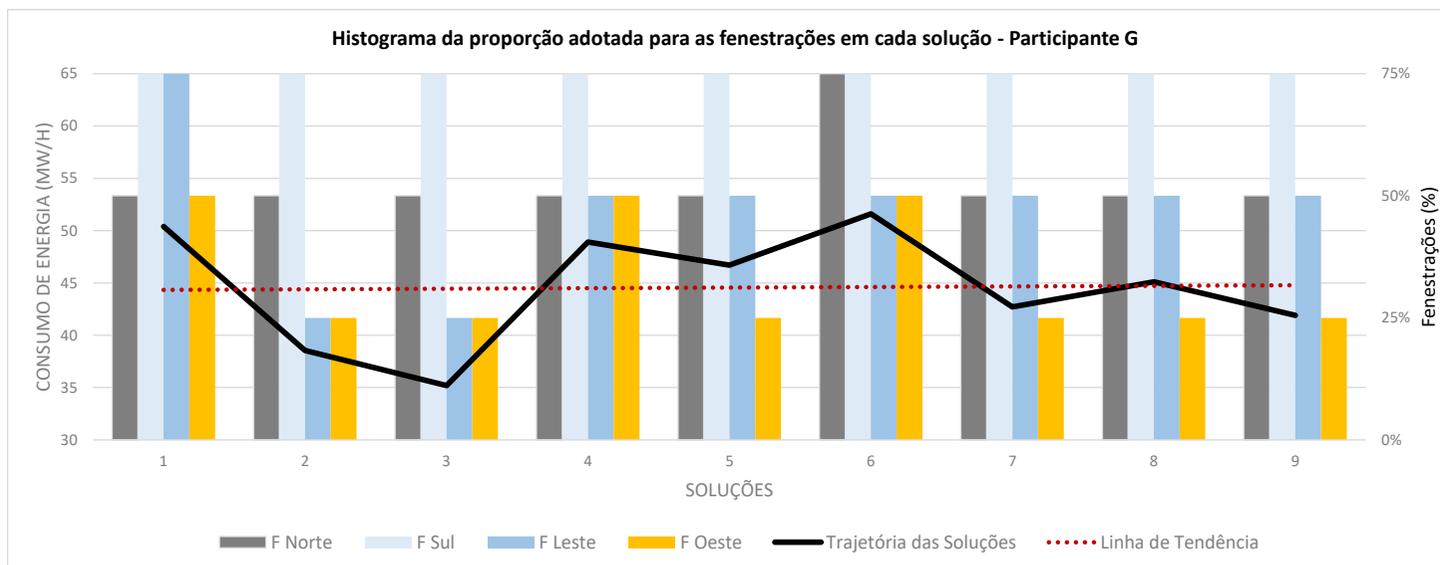
Participante G

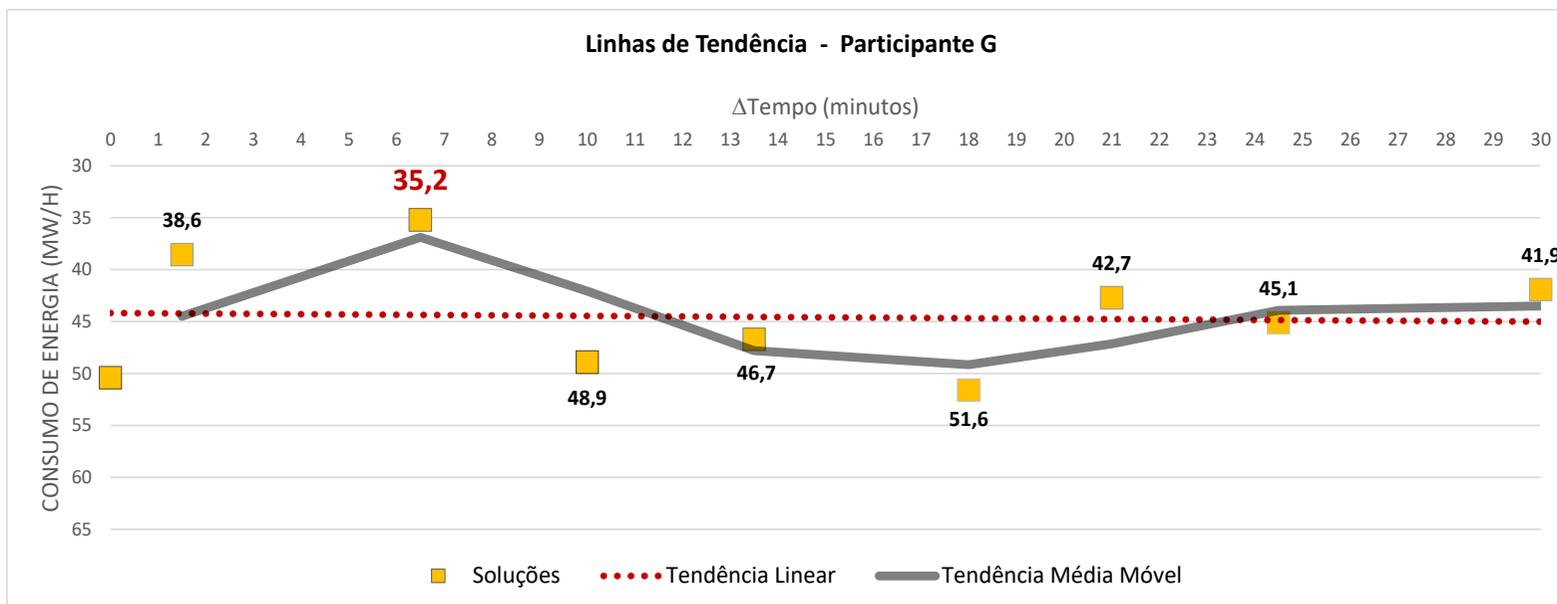
Participante G 30anos 7ºsemestre

Maquetes em etapas iniciais: freq. Softwares em etapas iniciais: SketchUp principalmente Desempenho em etapas iniciais: insolação, iluminação e ventilação

PARÂMETROS	SOLUÇÕES								
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°
Tempo (min.)	0	1,50	6,50	10,00	13,50	18,00	21,00	24,50	30,00
Fenestrações	F Norte	50%	50%	50%	50%	50%	75%	50%	50%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F Leste	75%	25%	25%	50%	50%	50%	50%	50%
	F Oeste	50%	25%	25%	50%	25%	50%	25%	25%
Geometria (pers sudoeste)									
Desempenho (MWh)	50,4	38,6	35,2	48,9	46,7	51,6	42,7	45,1	41,9



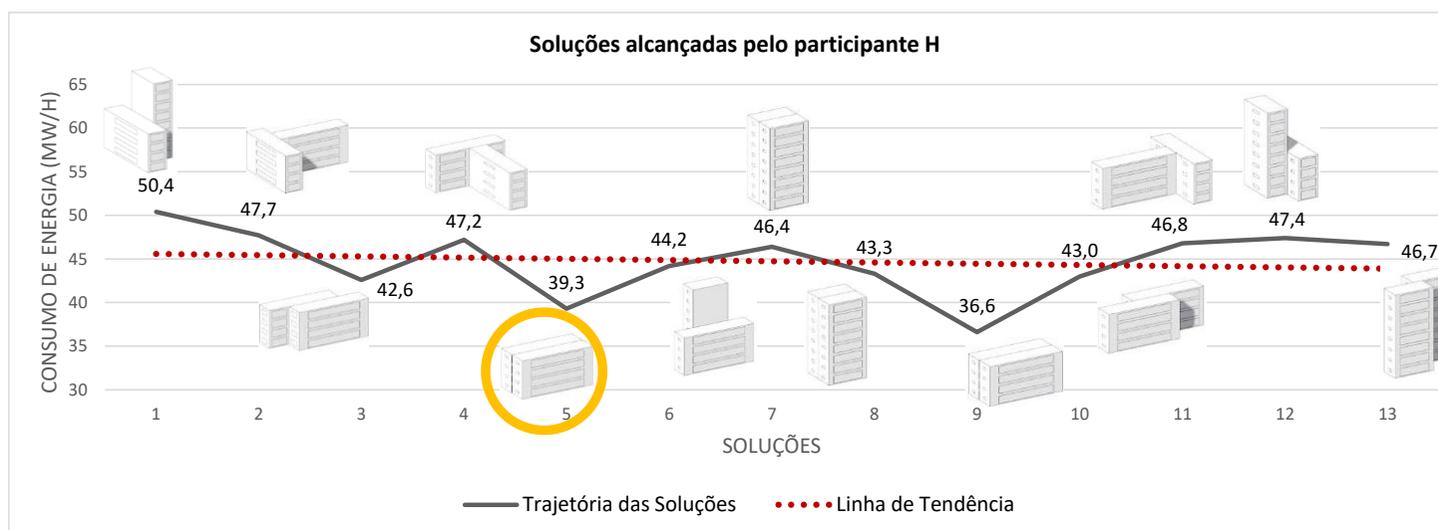


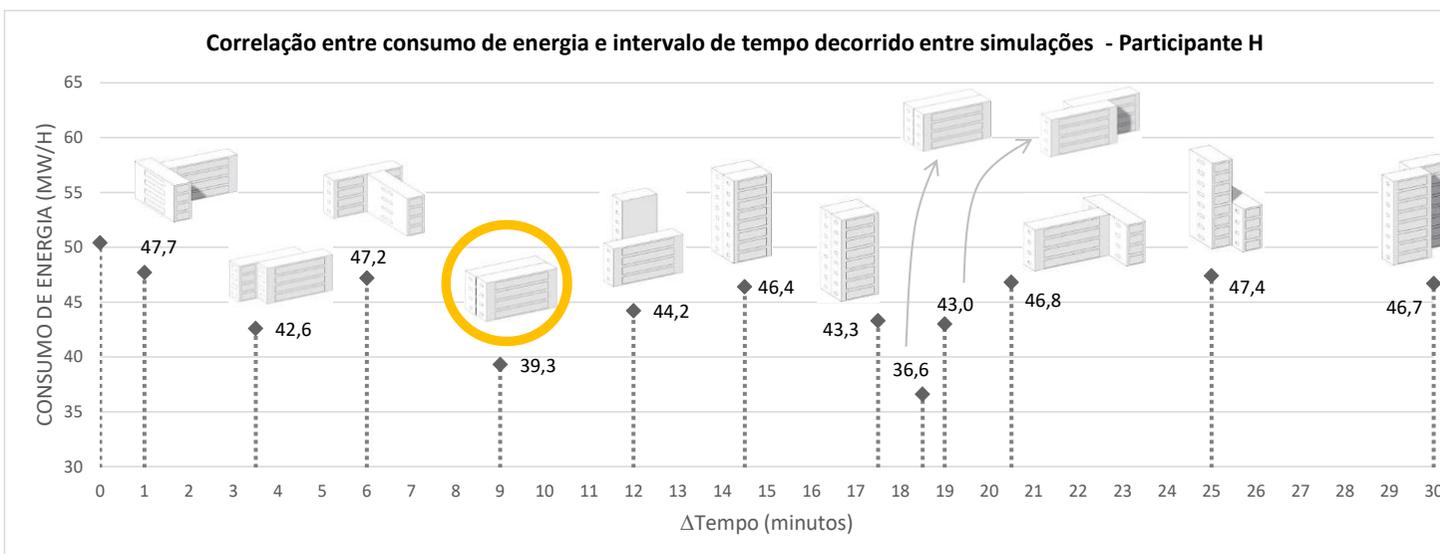
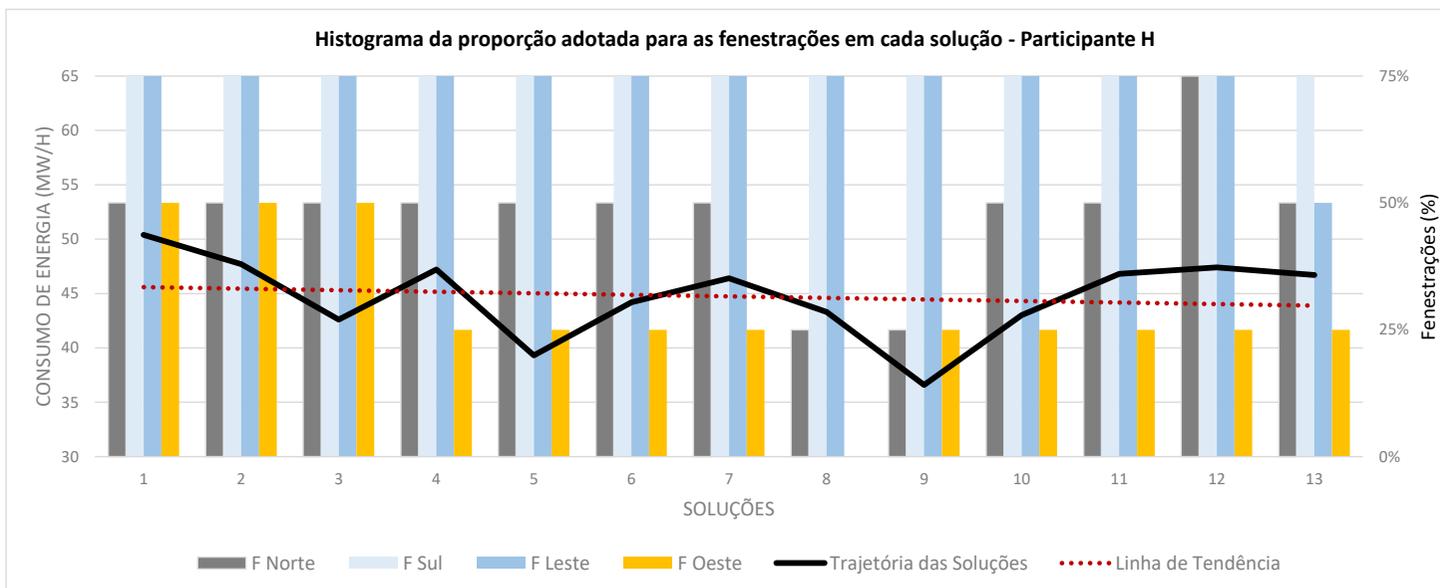


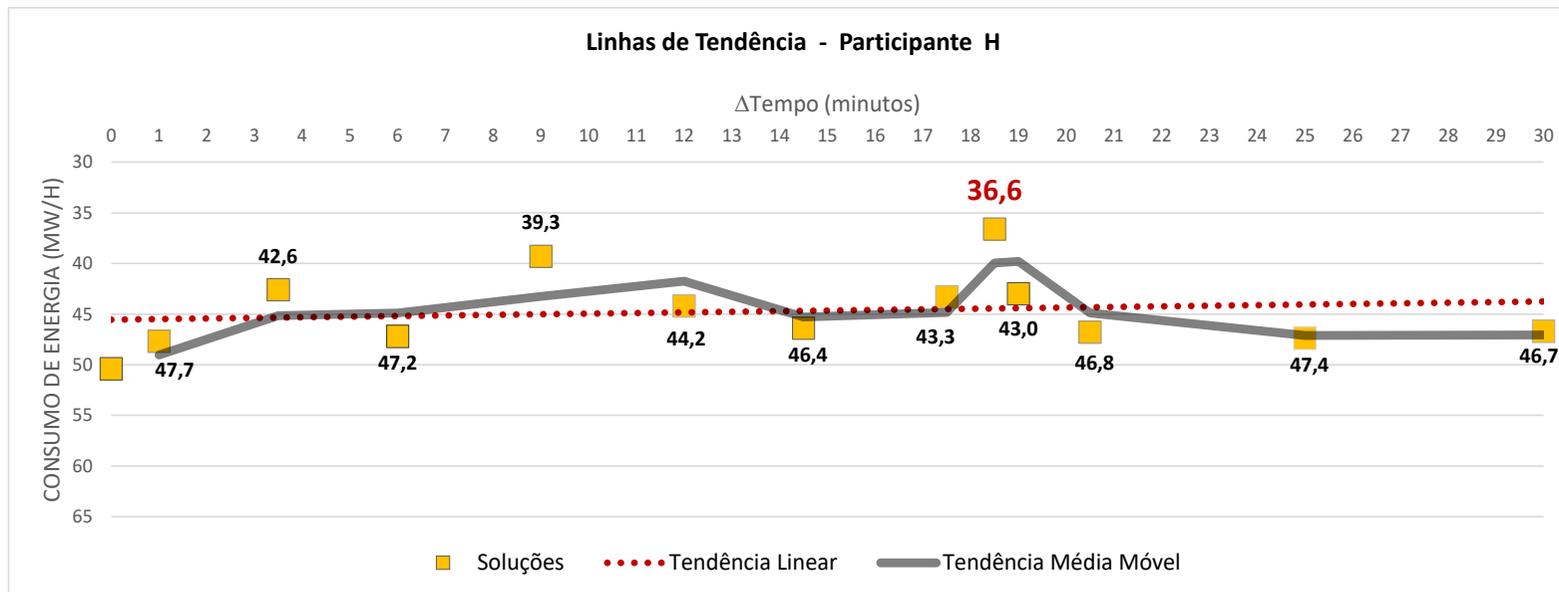
Participante H

Participante H 21anos 7º semestre
 Maquetes em etapas iniciais: pouco Softwares em etapas iniciais: SketchUp e Archicad Desempenho em etapas iniciais: não

PARÂMETROS	SOLUÇÕES												
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°
Tempo (min.)	0	1,00	3,50	6,00	9,00	12,00	14,50	17,50	18,50	19,00	20,50	25,00	30,00
Fenestrações	F Norte	50%	50%	50%	50%	50%	50%	25%	25%	50%	50%	75%	50%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F Leste	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	50%
	F Oeste	50%	50%	50%	25%	25%	25%	25%	0%	25%	25%	25%	25%
Geometria (pers sudoeste)													
Desempenho (MW/h)	50,4	47,7	42,6	47,2	39,3	44,2	46,4	43,3	36,6	43,0	46,8	47,4	46,7

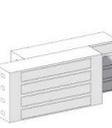
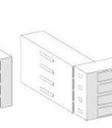
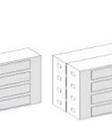
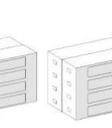
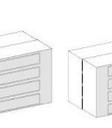


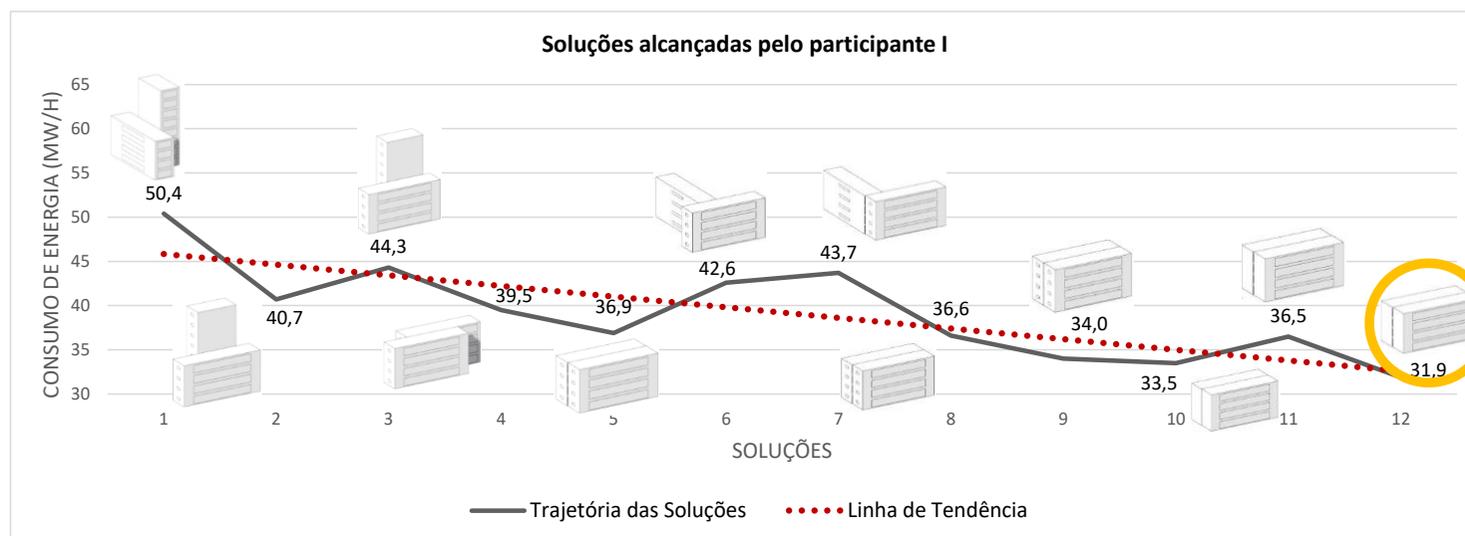


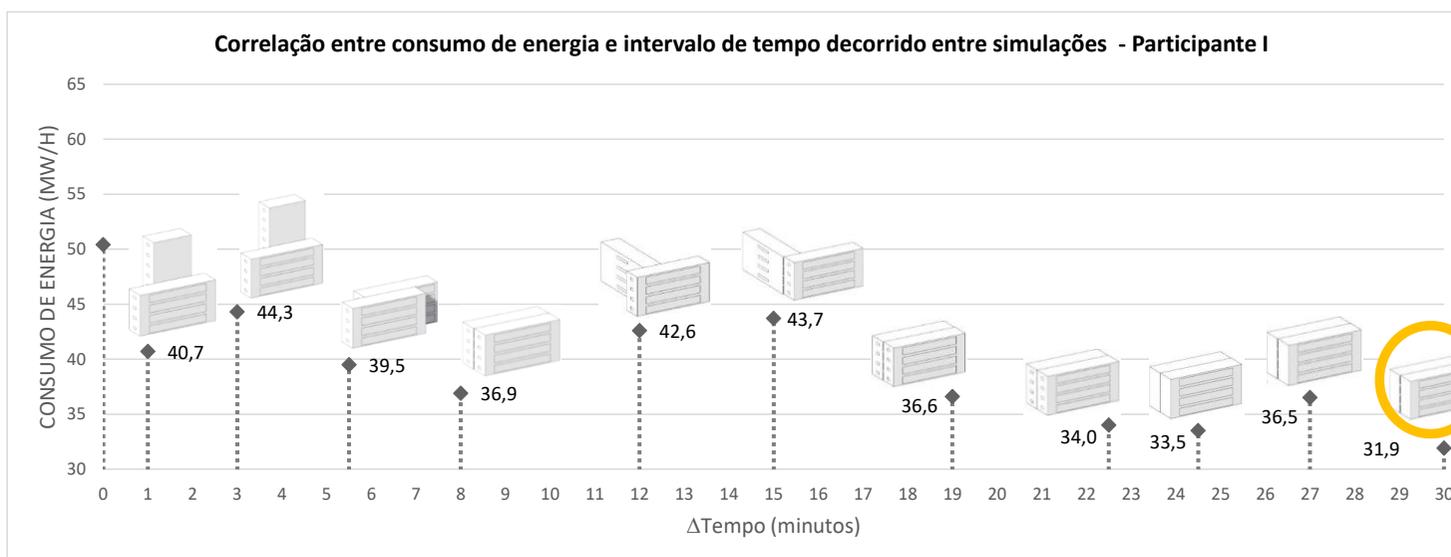
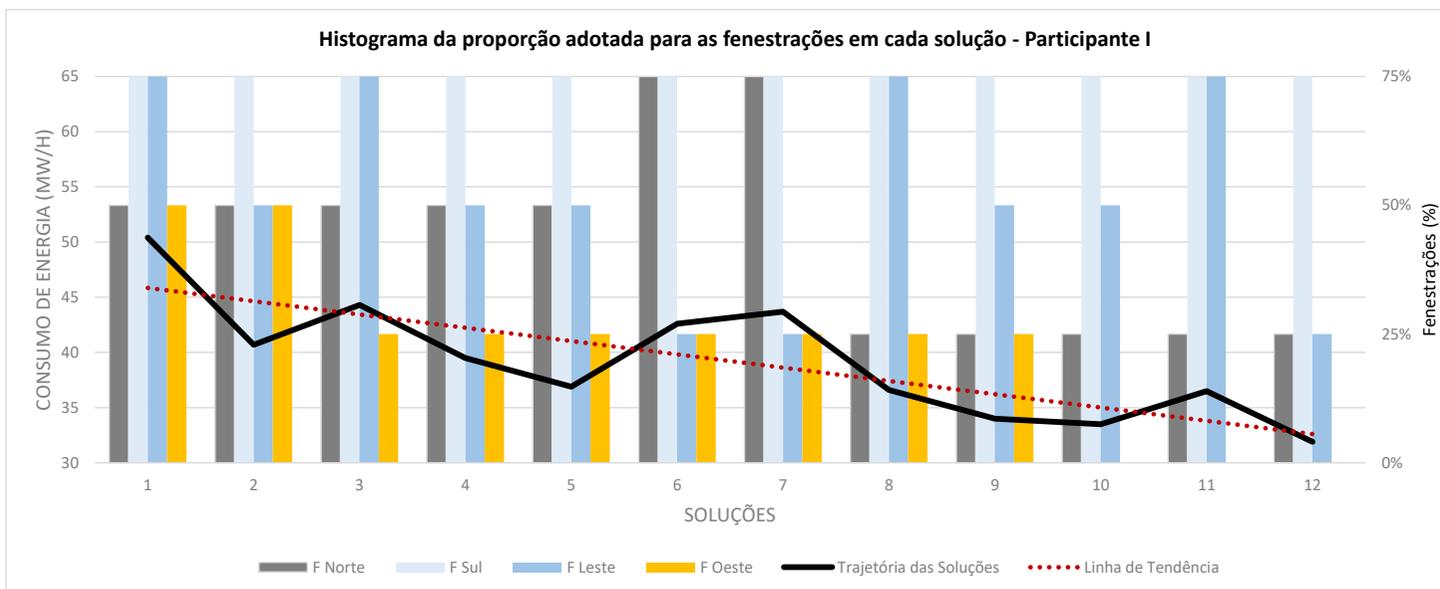


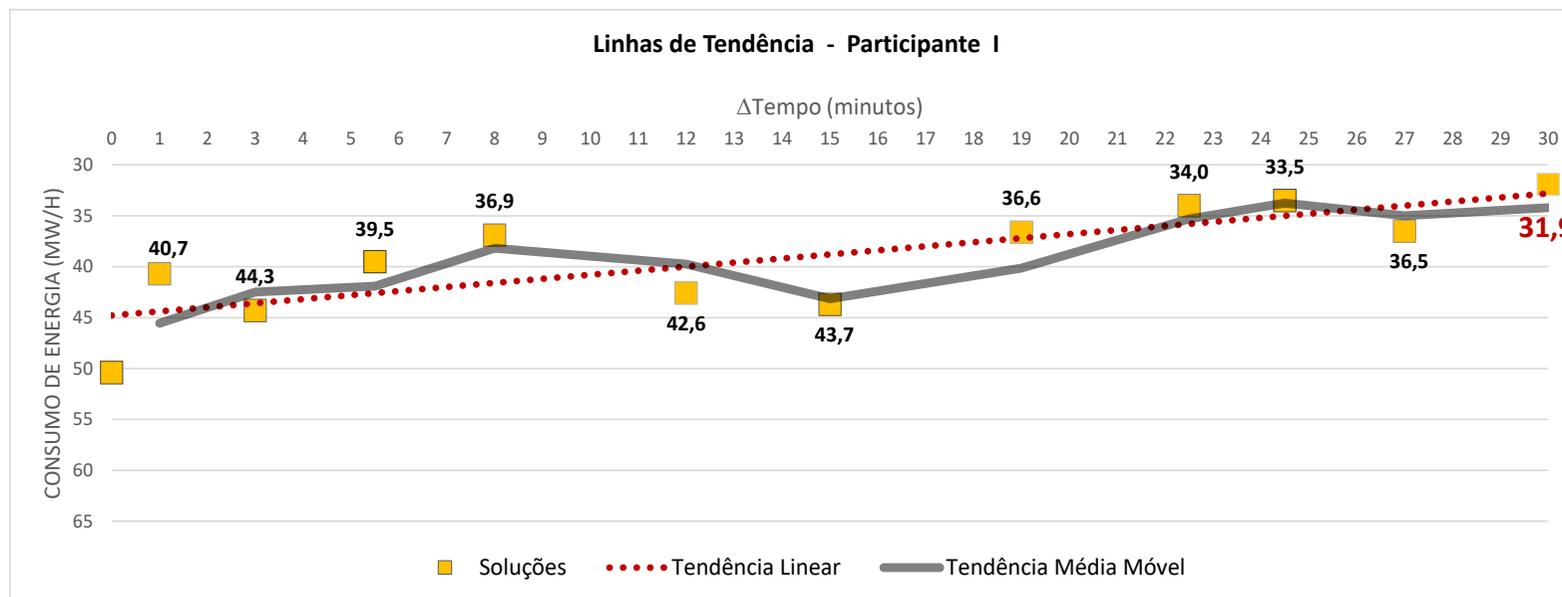
Participante I

Participante I 23anos 8º semestre
 Maquetes em etapas iniciais: pouco Softwares em etapas iniciais: SketchUp e Autocad Desempenho em etapas iniciais: não

PARÂMETROS	SOLUÇÕES											
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°
Tempo (min.)	0	1,00	3,00	5,50	8,00	12,00	15,00	19,00	22,50	24,50	27,00	30,00
Fenestrações	F Norte	50%	50%	50%	50%	50%	75%	75%	25%	25%	25%	25%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F Leste	75%	50%	75%	50%	50%	25%	25%	75%	50%	50%	75%
	F Oeste	50%	50%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	0%	0%
Geometria (pers sudoeste)												
Desempenho (MW/h)	50,4	40,7	44,3	39,5	36,9	42,6	43,7	36,6	34,0	33,5	36,5	31,9

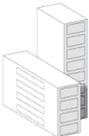


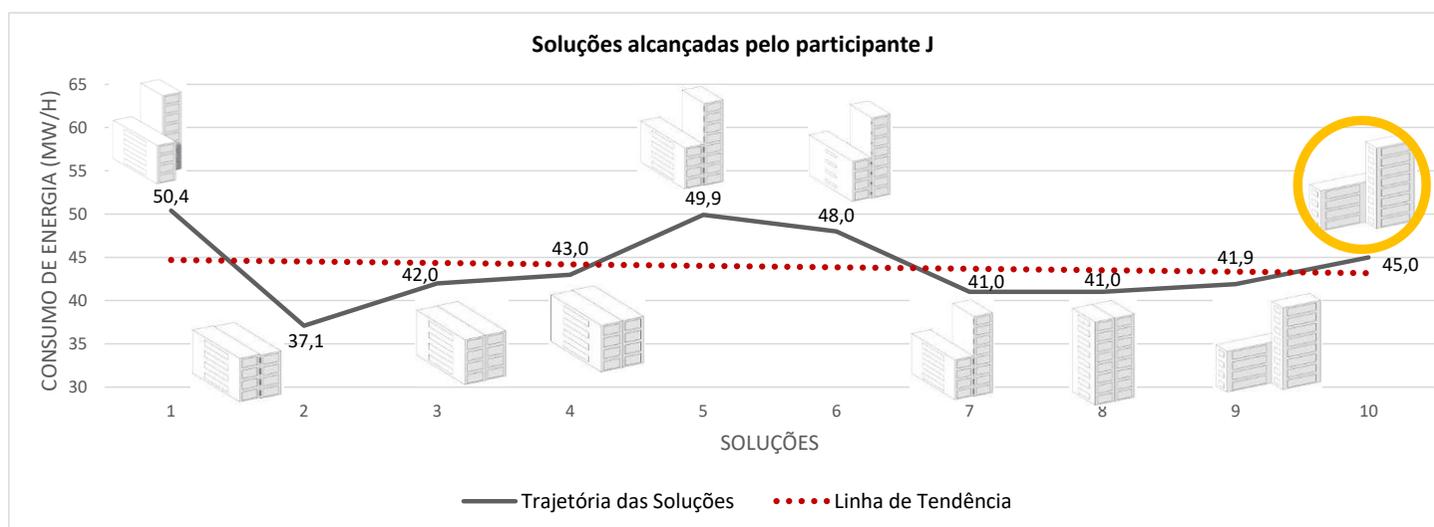


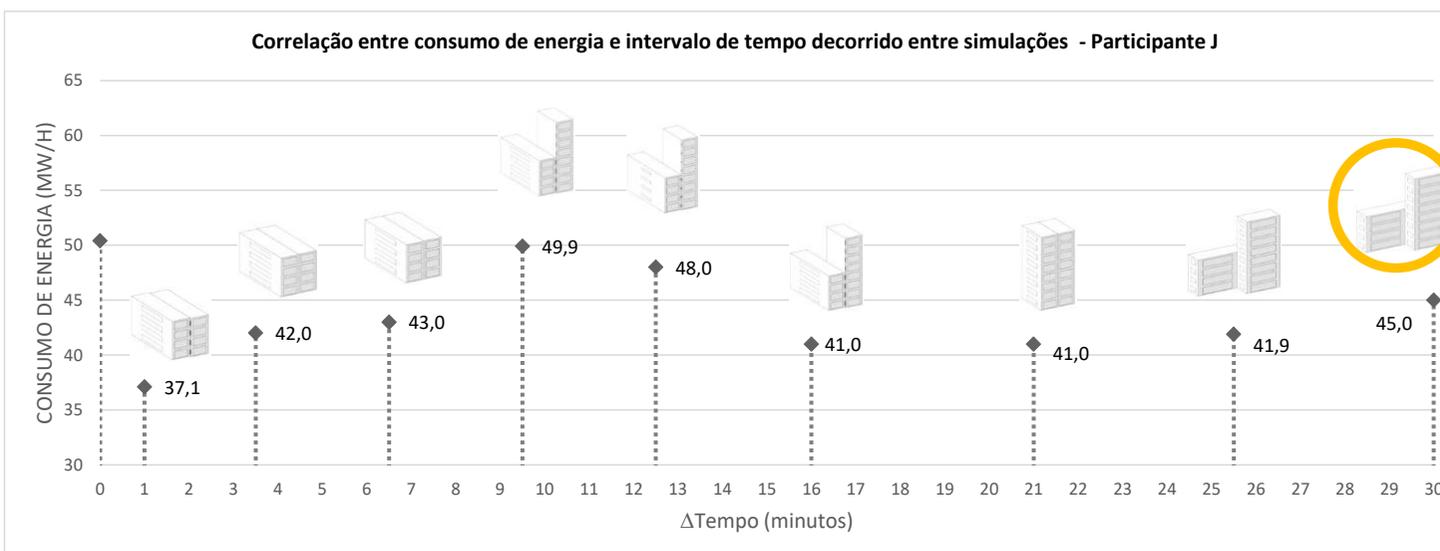
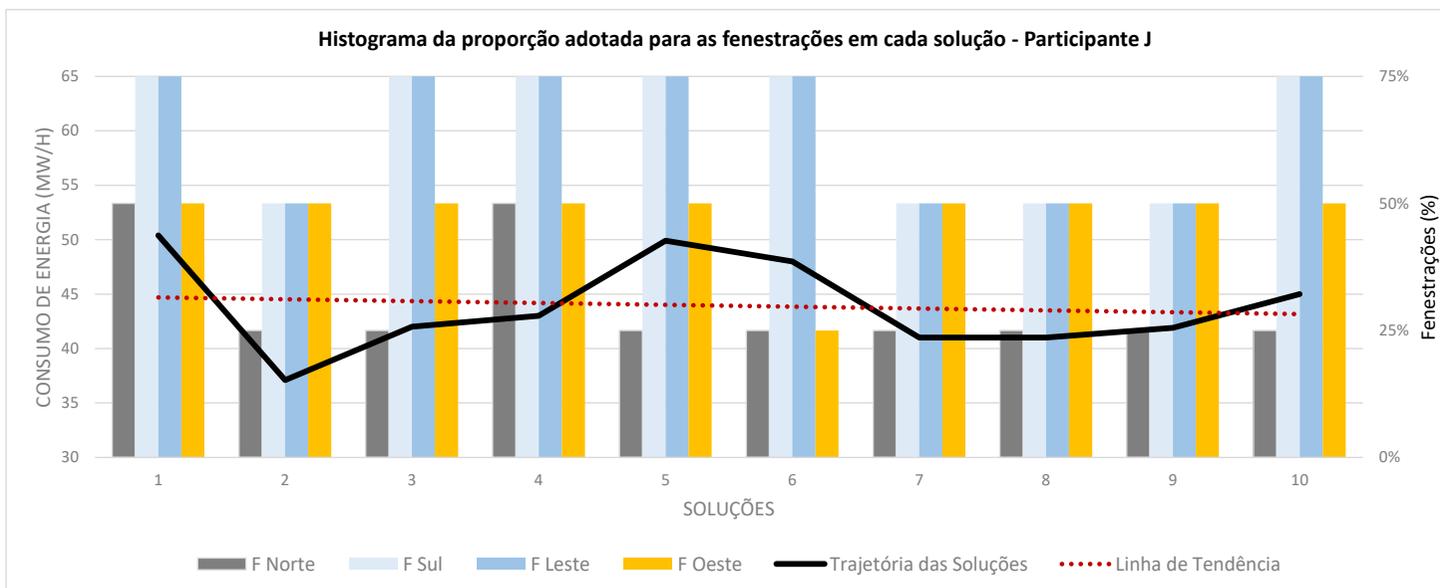


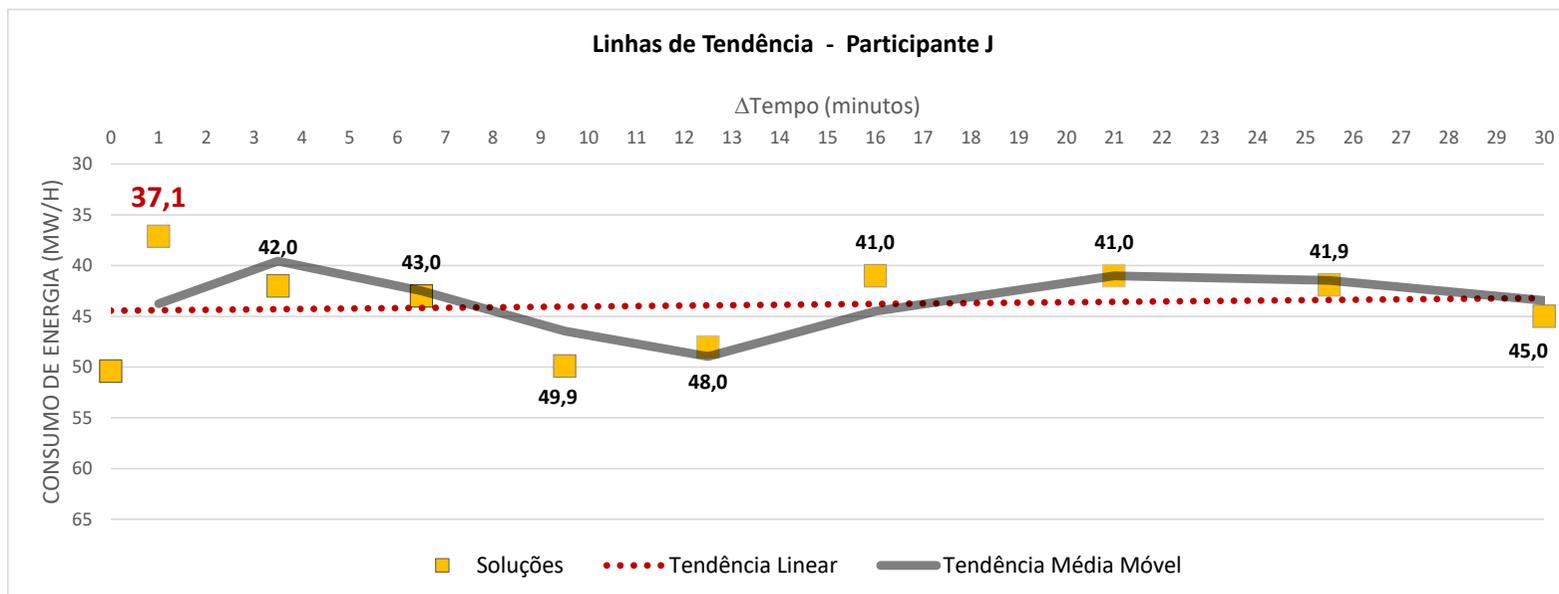
Participante J

Participante J 29anos 8º semestre
 Maquetes em etapas iniciais: pouco Softwares em etapas iniciais: SketchUp Desempenho em etapas iniciais: insolação

PARÂMETROS		SOLUÇÕES									
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
Tempo (min.)		0	1,00	3,50	6,50	9,50	12,50	16,00	21,00	25,50	30,00
Fenestrações	F Norte	50%	25%	25%	50%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F Leste	75%	50%	75%	75%	75%	75%	50%	50%	50%	75%
	F Oeste	50%	50%	50%	50%	50%	25%	50%	50%	50%	50%
Geometria (pers sudoeste)											
Desempenho (MW/h)		50,4	37,1	42,0	43,0	49,9	48,0	41,0	41,0	41,9	45,0

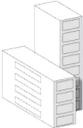


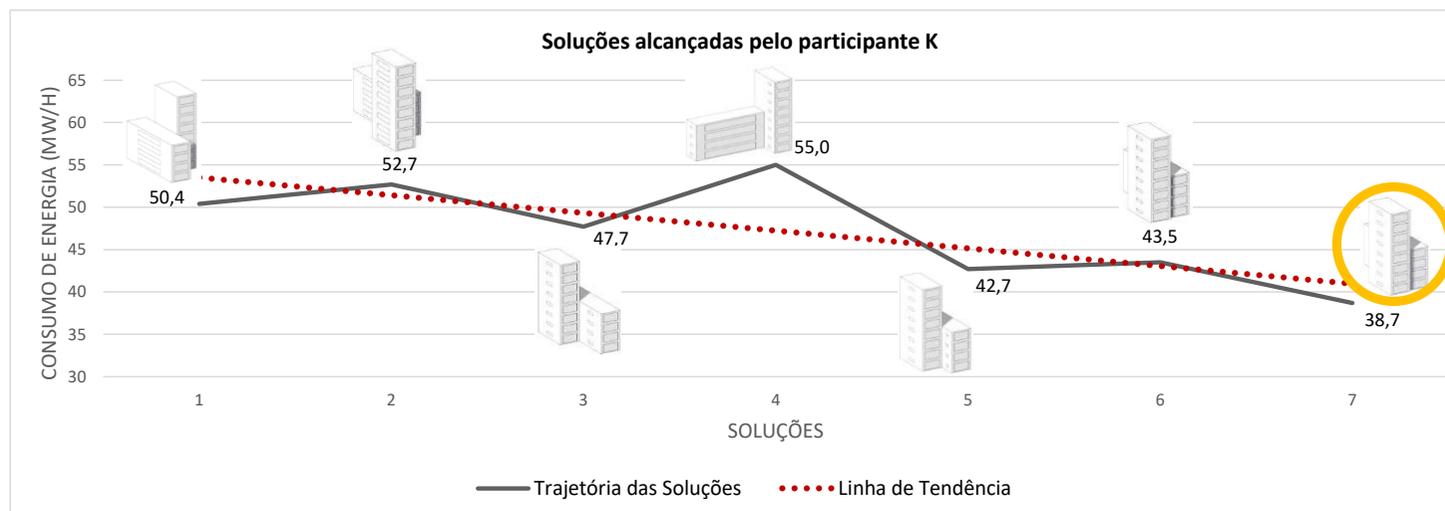


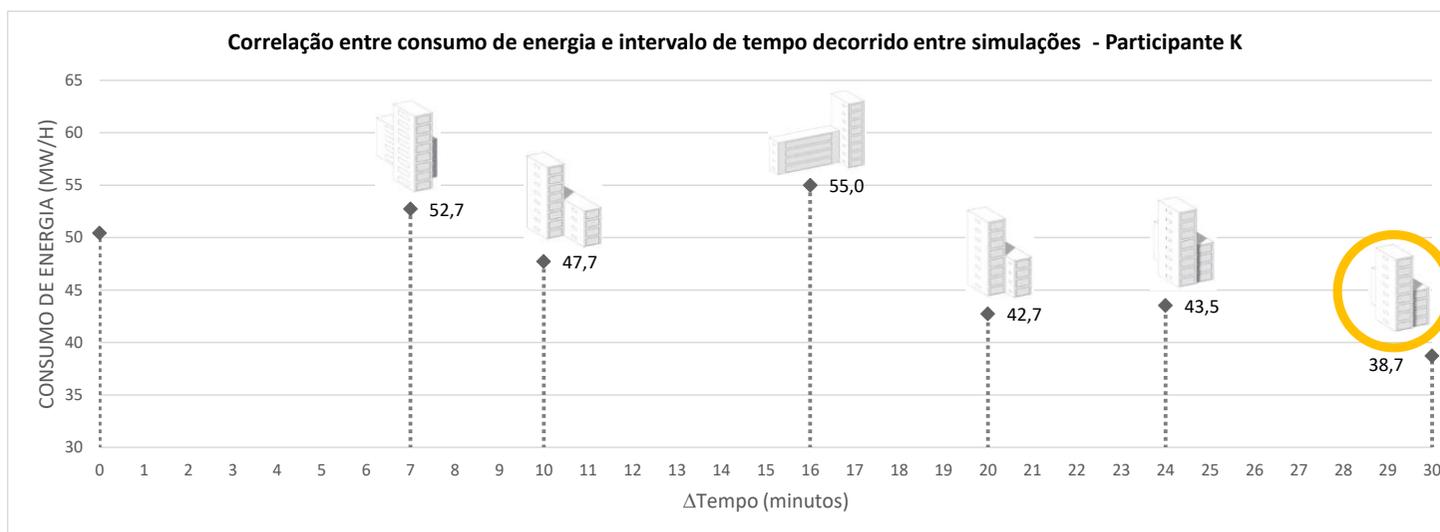
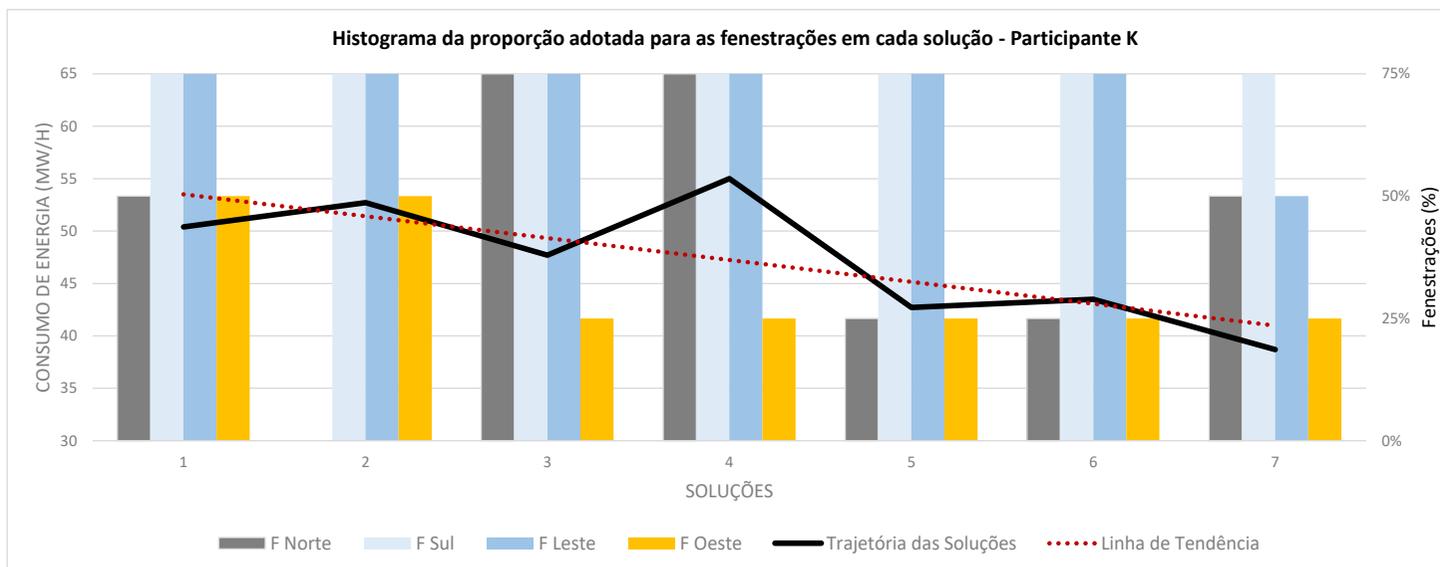


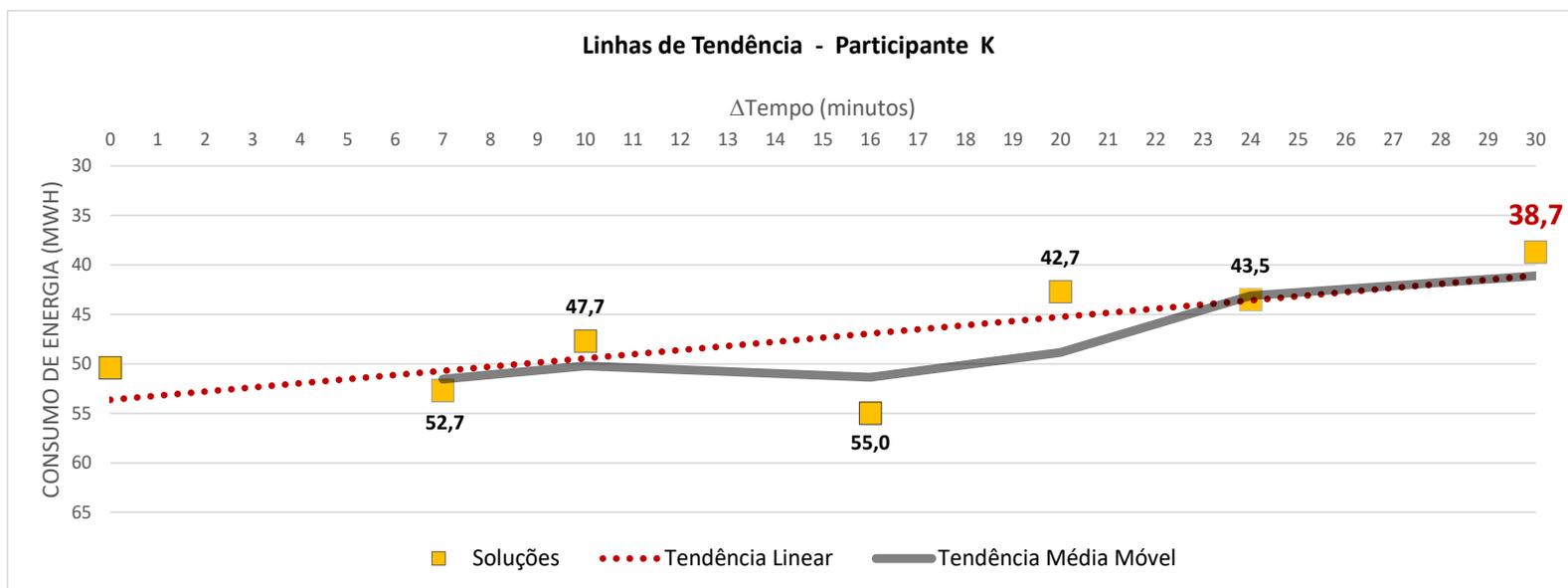
Participante K

Participante K 22anos 9º semestre
 Maquetes em etapas iniciais: pouco Softwares em etapas iniciais: SketchUp Desempenho em etapas iniciais: insolação

PARÂMETROS		SOLUÇÕES						
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°
Tempo (min.)		0	7,00	10,00	16,00	20,00	24,00	30,00
Fenestrações	F Norte	50%	0%	75%	75%	25%	25%	50%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F Leste	75%	75%	75%	75%	75%	75%	50%
	F Oeste	50%	50%	25%	25%	25%	25%	25%
Geometria (pers sudoeste)								
Desempenho (MW/h)		50,4	52,7	47,7	55,0	42,7	43,5	38,7

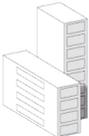
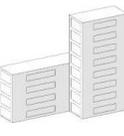
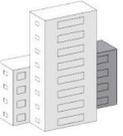
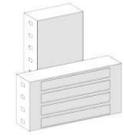
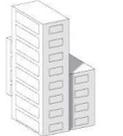
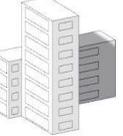


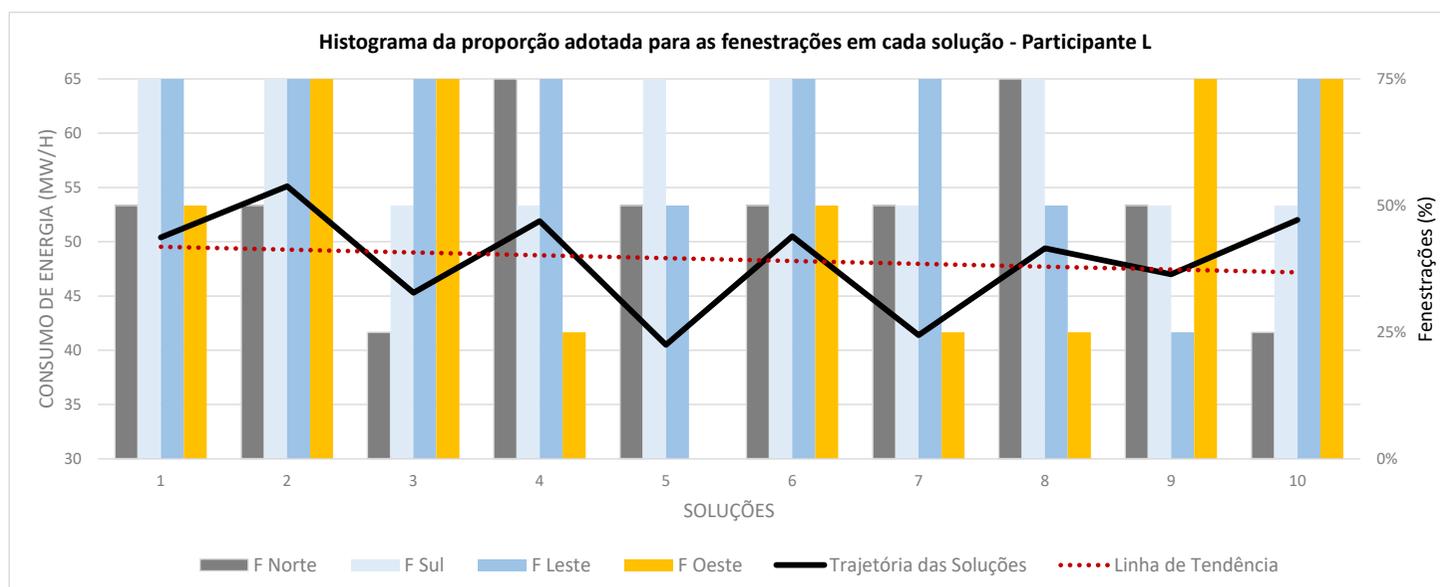
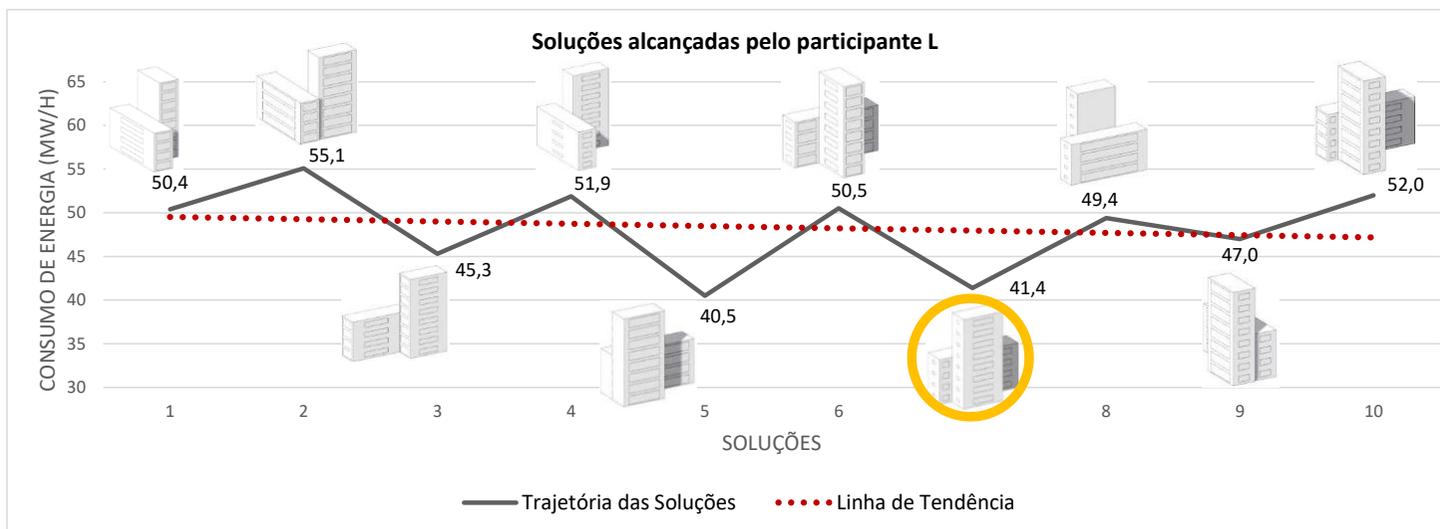


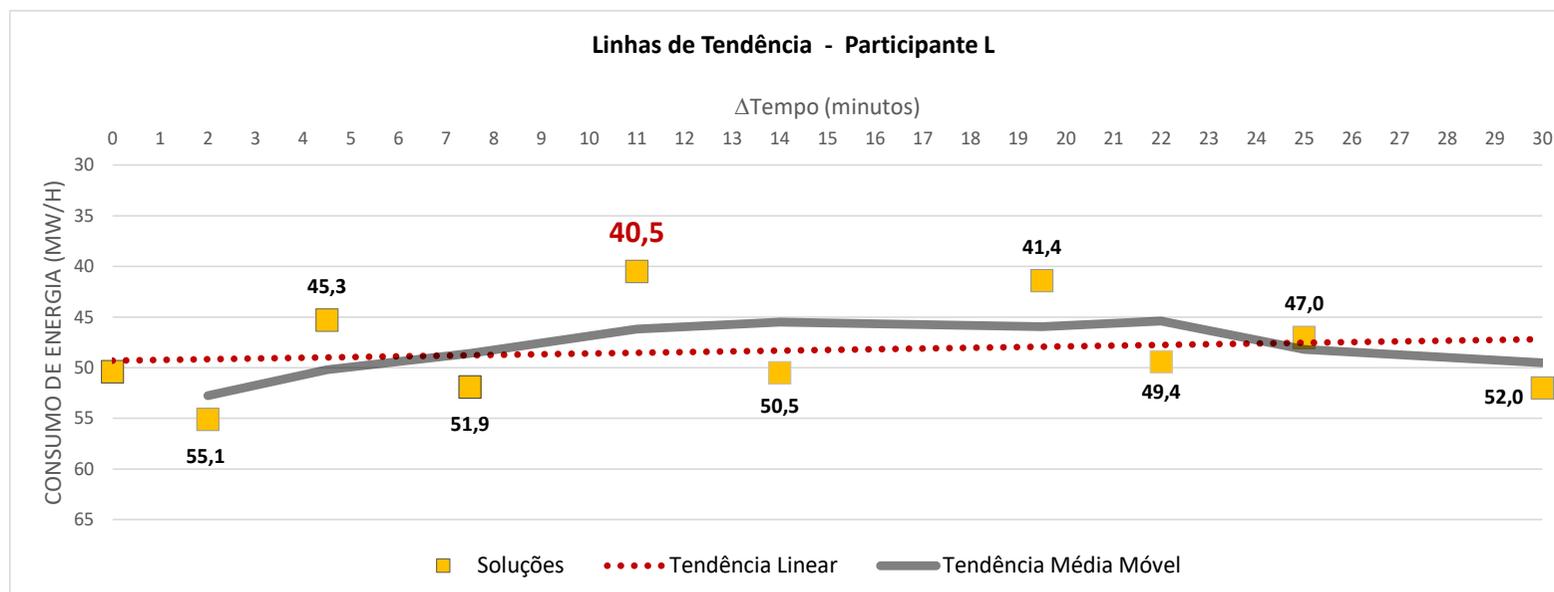
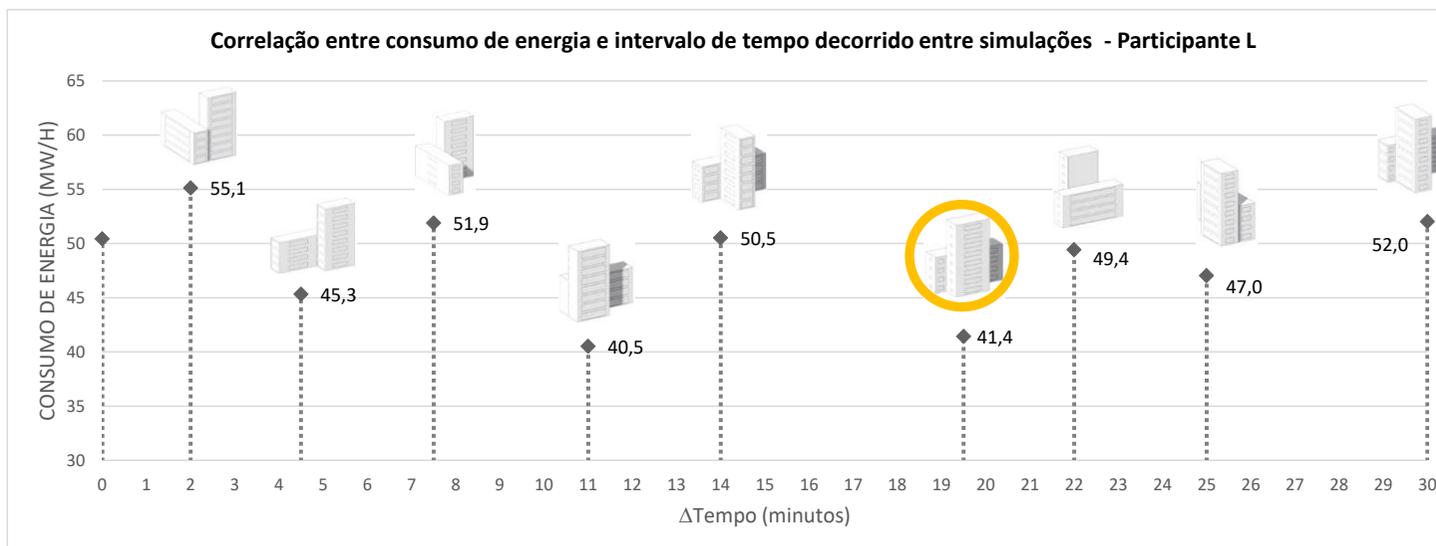


Participante L

Participante L 21anos 6º semestre
 Maquetes em etapas iniciais: pouco Softwares em etapas iniciais: SketchUp e Archicad Desempenho em etapas iniciais: não

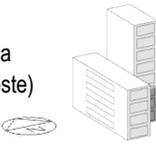
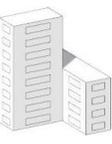
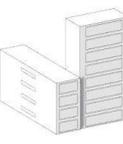
PARÂMETROS		SOLUÇÕES									
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
Tempo (min.)		0	2,00	4,50	7,50	11,00	14,00	19,50	22,00	25,00	30,00
Fenestração	F Norte	50%	50%	25%	75%	50%	50%	50%	75%	50%	25%
	F Sul	75%	75%	50%	50%	75%	75%	50%	75%	50%	50%
	F Leste	75%	75%	75%	75%	50%	75%	75%	50%	25%	75%
	F Oeste	50%	75%	75%	25%	0%	50%	25%	25%	75%	75%
Geometria (pers sudoeste)											
Desempenho (MW/h)		50,4	55,1	45,3	51,9	40,5	50,5	41,4	49,4	47,0	52,0

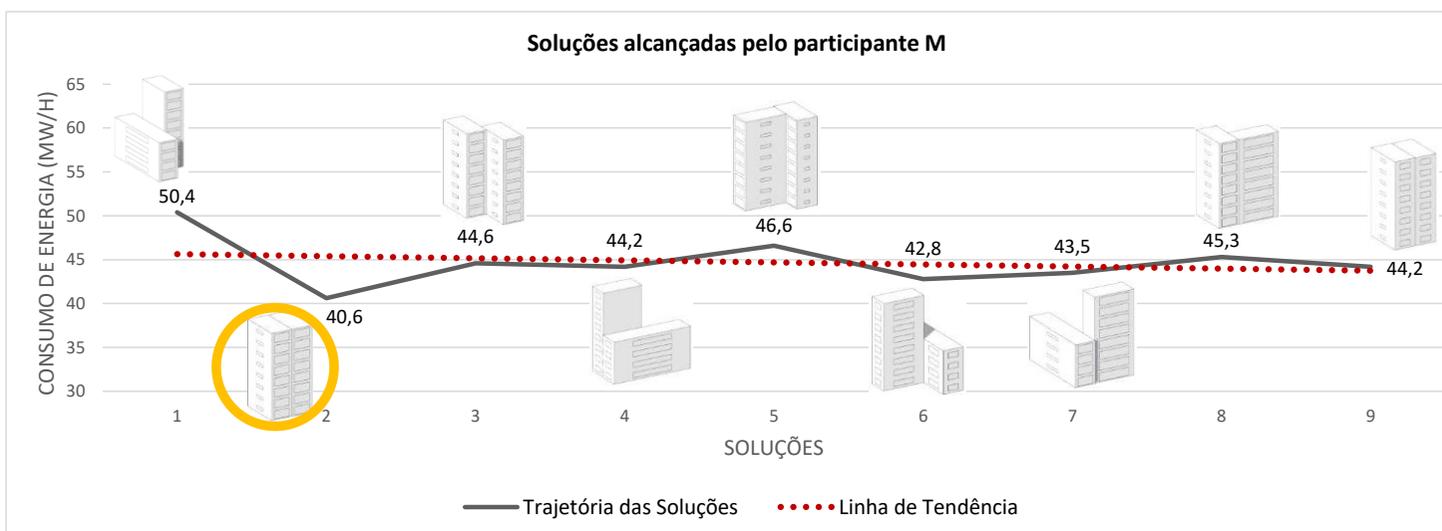


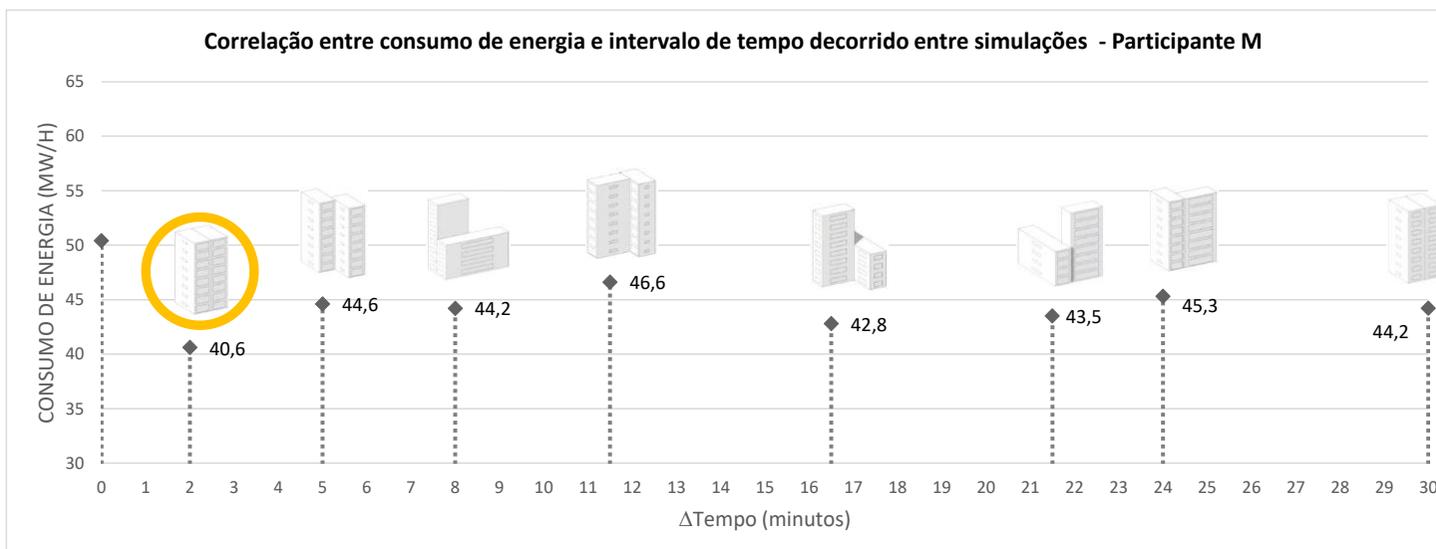
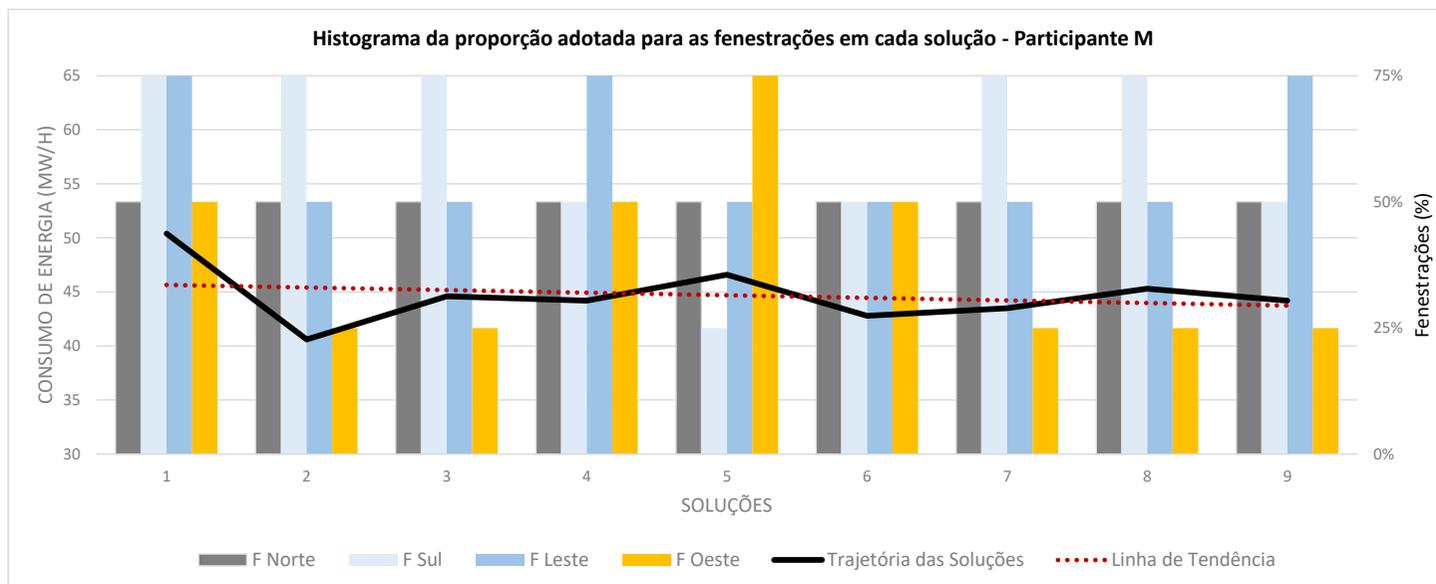


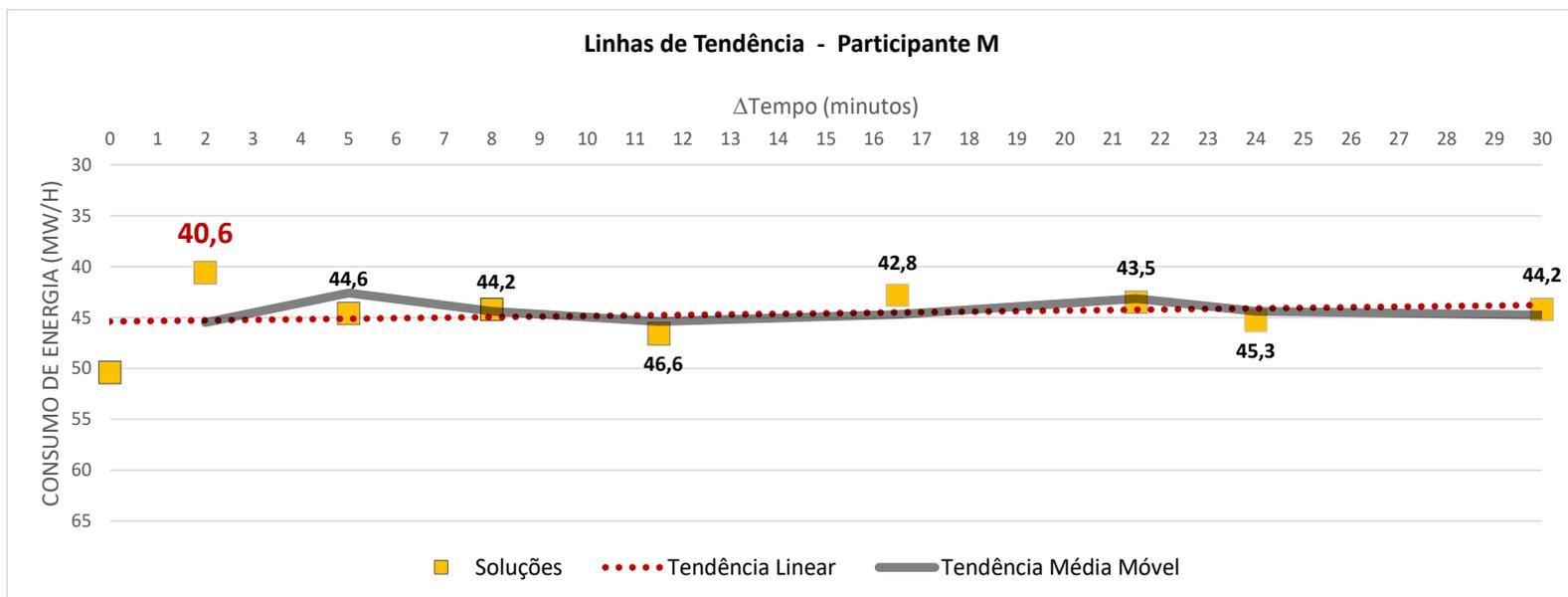
Participante M

Participante M 26anos 10º semestre
 Maquetes em etapas iniciais: pouco Softwares em etapas iniciais: SketchUp e Archicad Desempenho em etapas iniciais: não

PARÂMETROS		SOLUÇÕES								
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°
Tempo (min.)		0	2,00	5,00	8,00	11,50	16,50	21,50	24,00	30,00
Fenestrações	F Norte	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
	F Sul	75%	75%	75%	50%	25%	50%	75%	75%	50%
	F Leste	75%	50%	50%	75%	50%	50%	50%	50%	75%
	F Oeste	50%	25%	25%	50%	75%	50%	25%	25%	25%
Geometria (pers sudoeste)										
Desempenho (MW/h)		50,4	40,6	44,6	44,2	46,6	42,8	43,5	45,3	44,2



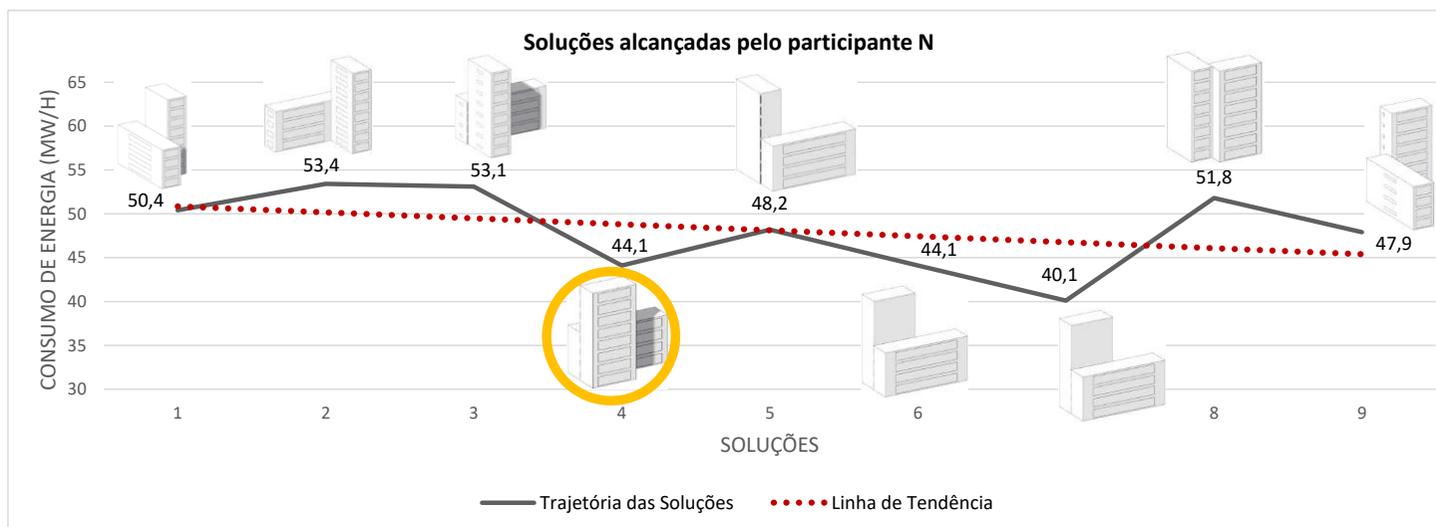


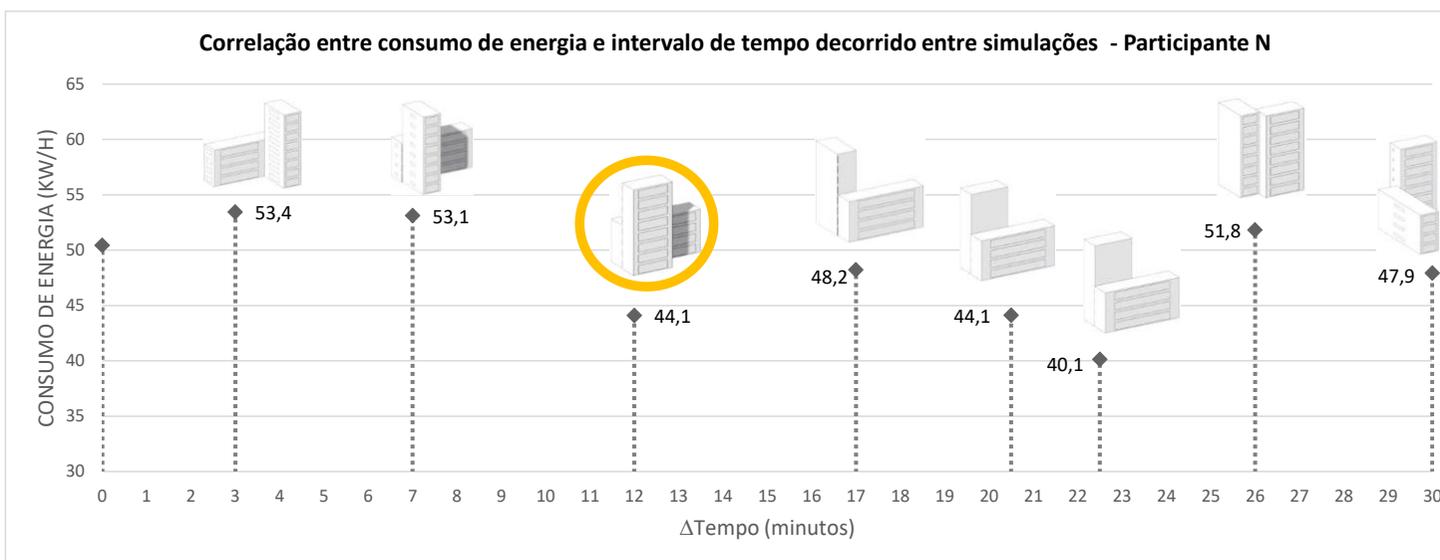
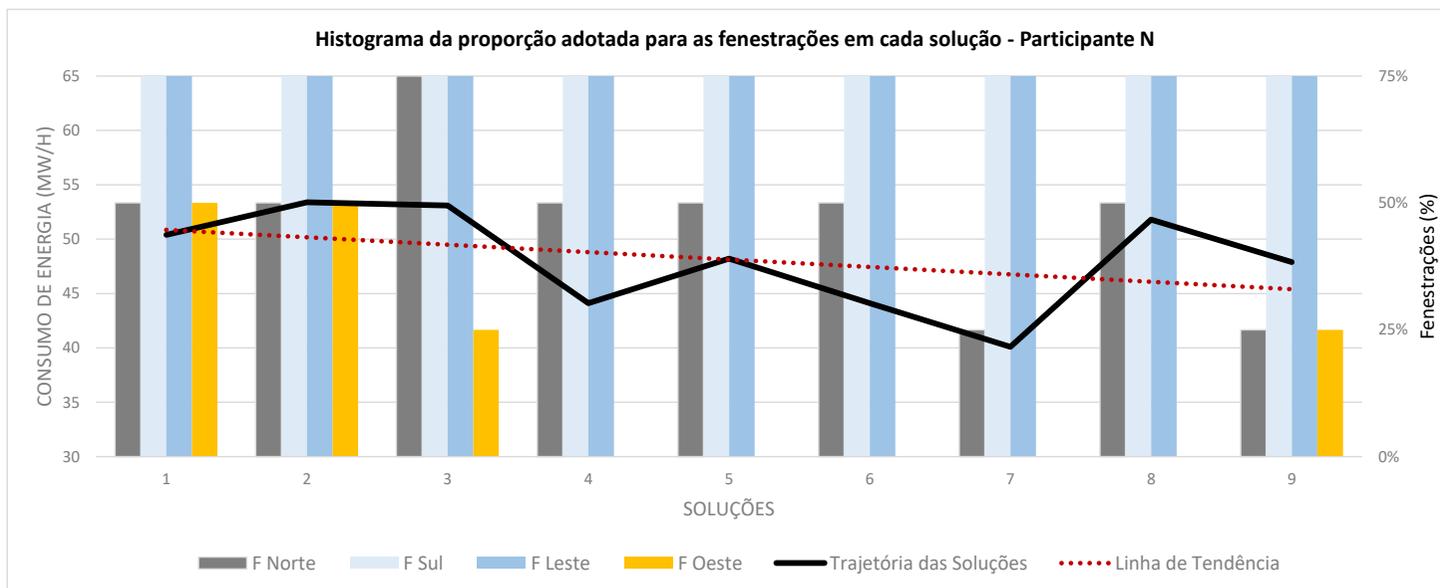


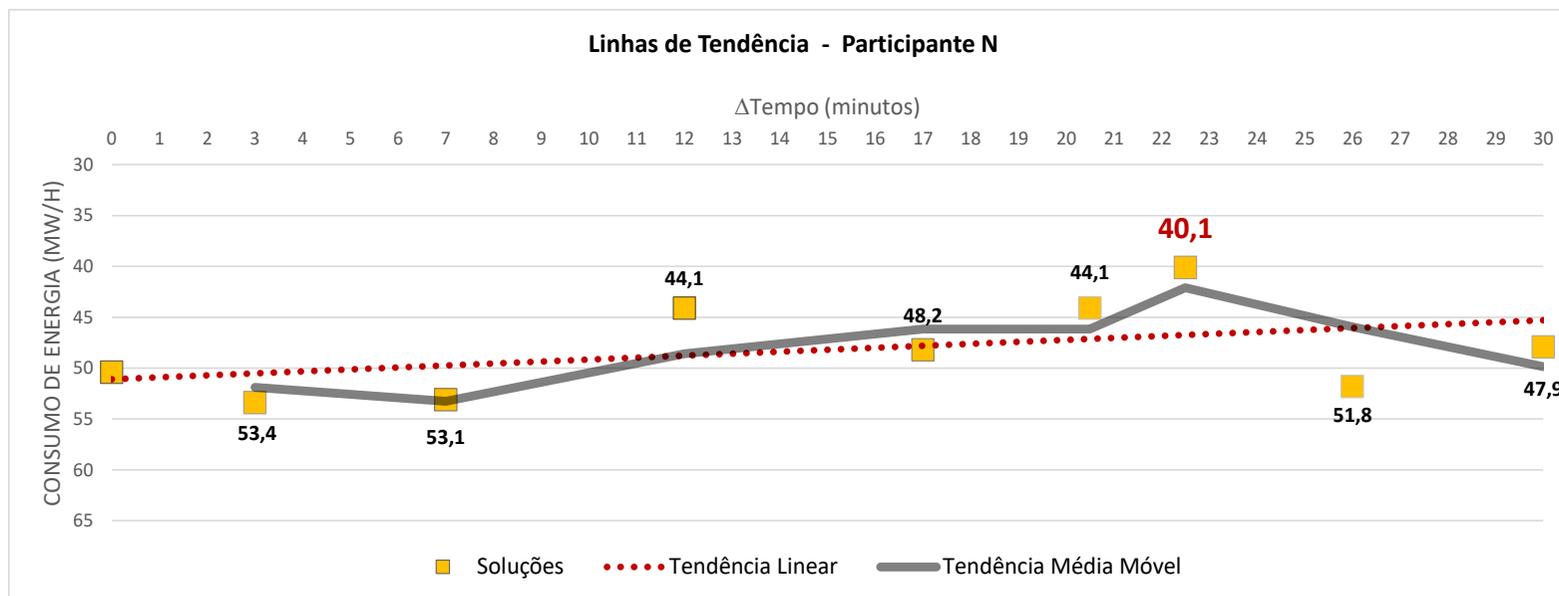
Participante N

Participante N 28anos 10º semestre
 Maquetes em etapas iniciais: frequentemente Softwares em etapas iniciais: SketchUp Desempenho em etapas iniciais: insolação

PARÂMETROS	SOLUÇÕES									
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	
Tempo (min.)	0	3,00	7,00	12,00	17,00	20,50	22,50	26,00	30,00	
Fenestrações	F Norte	50%	50%	75%	50%	50%	50%	25%	50%	25%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F Leste	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F Oeste	50%	50%	25%	0%	0%	0%	0%	0%	25%
Geometria (pers sudoeste)										
Desempenho (MWh)	50,4	53,4	53,1	44,1	48,2	44,1	40,1	51,8	47,9	





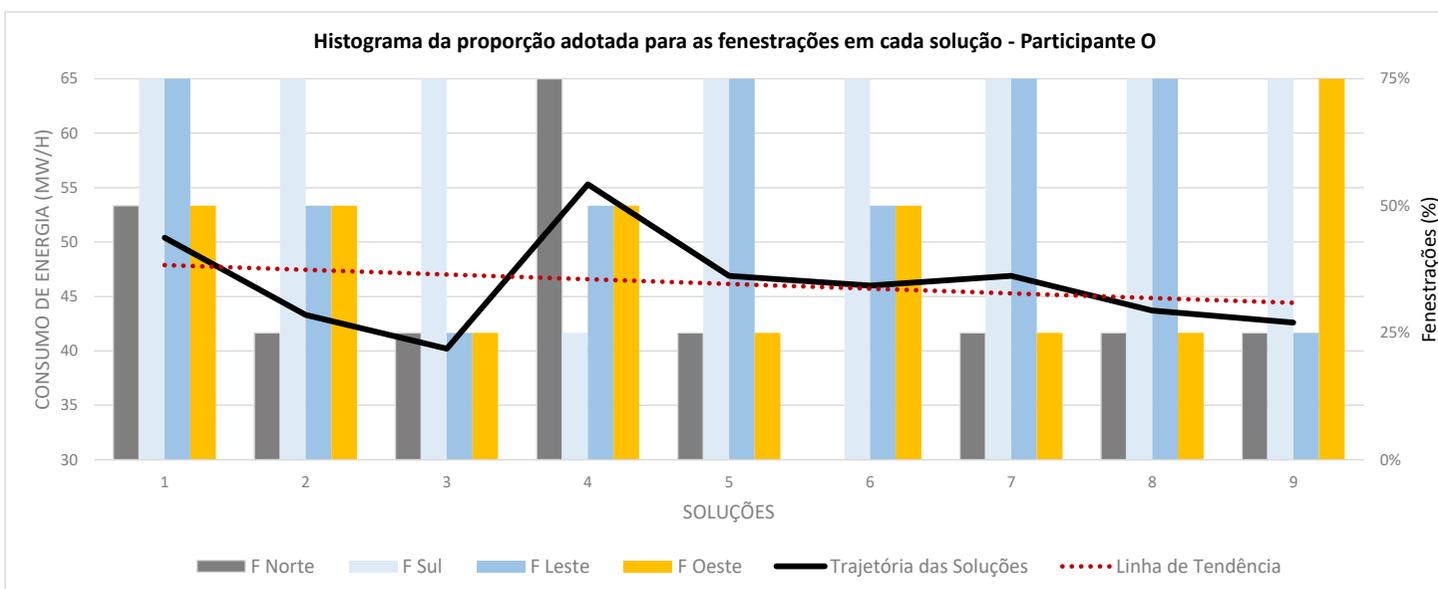
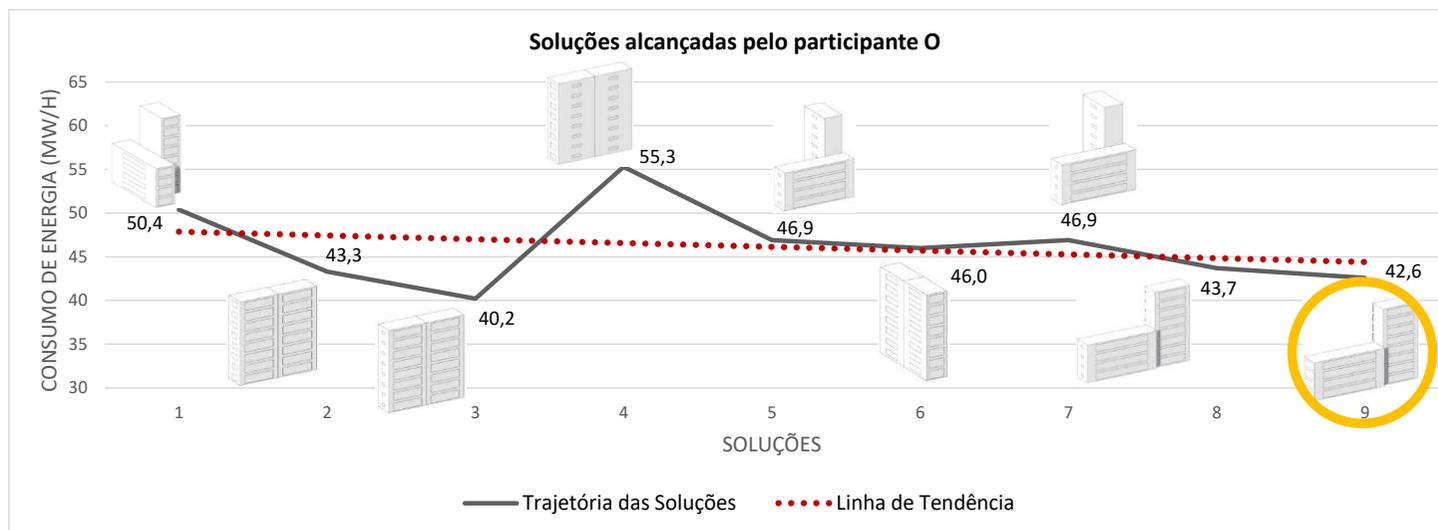


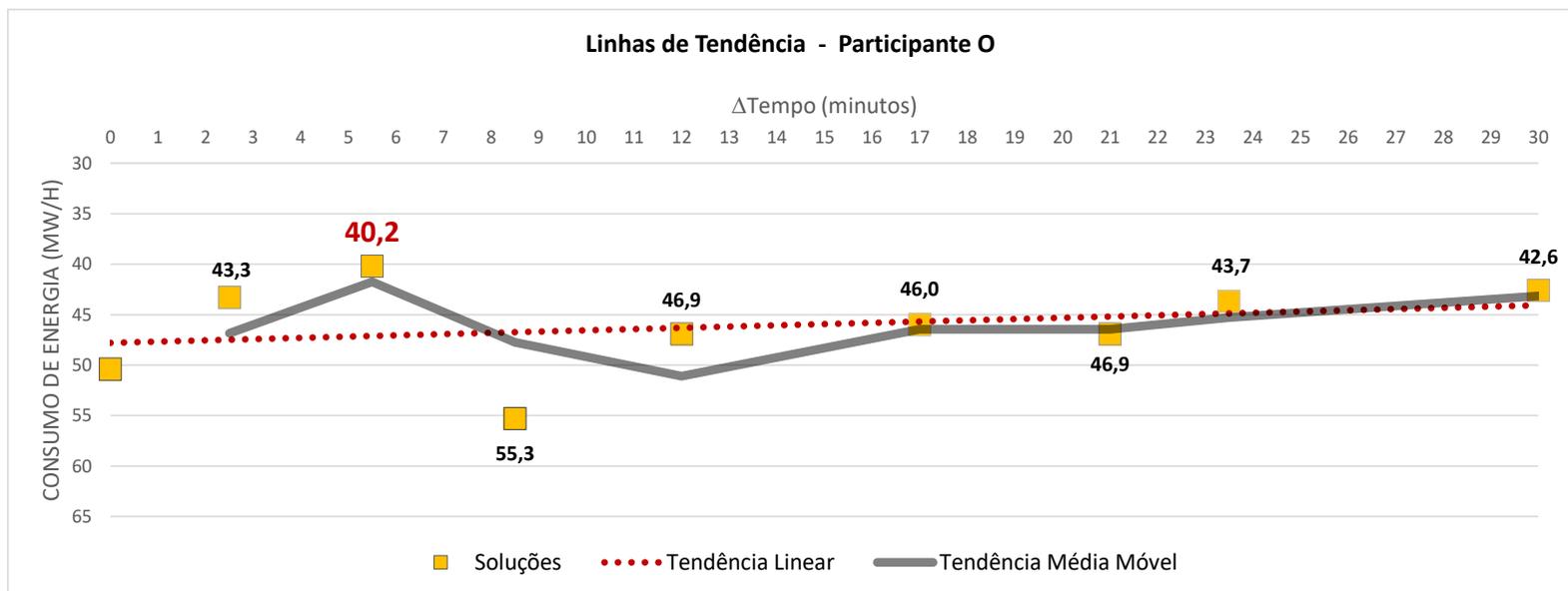
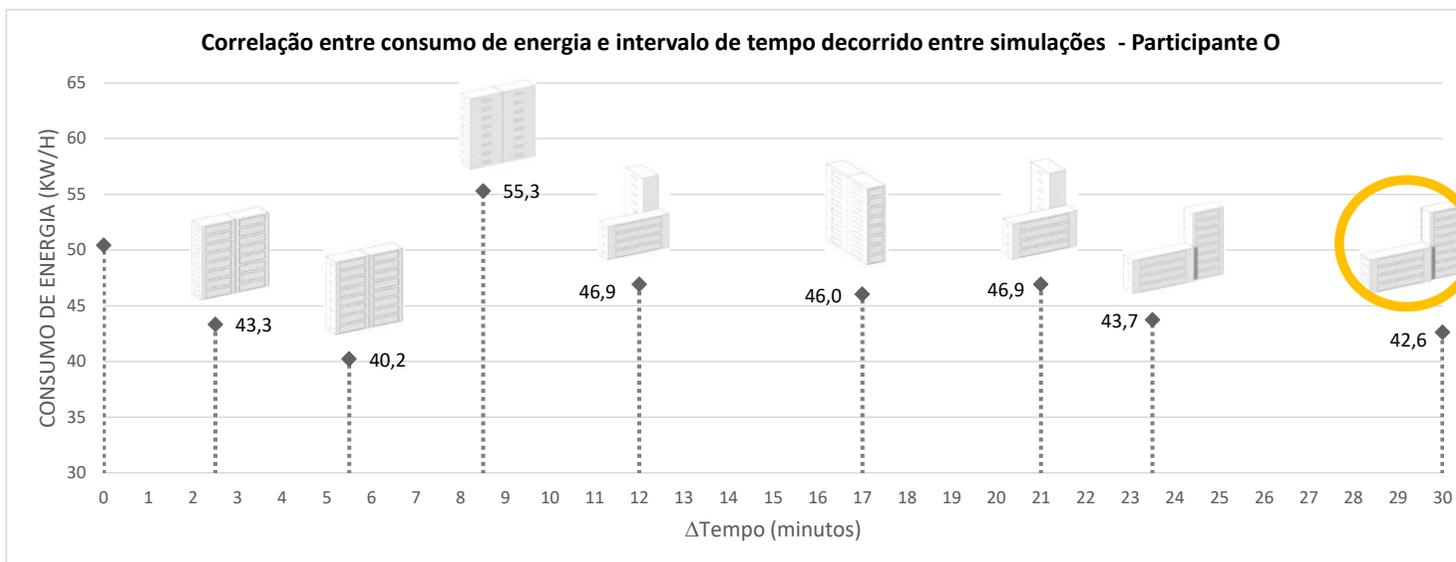
Participante O

Participante O 25anos 8º semestre

Maquetes em etapas iniciais: pouco Softwares em etapas iniciais: SketchUp e Archicad Desempenho em etapas iniciais: não

PARÂMETROS	SOLUÇÕES									
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	
Tempo (min.)	0	2,50	5,50	8,50	12,00	17,00	21,00	23,50	30,00	
Fenestraçãoes	F Norte	50%	25%	25%	75%	25%	0%	25%	25%	25%
	F Sul	75%	75%	75%	25%	75%	75%	75%	75%	75%
	F Leste	75%	50%	25%	50%	75%	50%	75%	75%	25%
	F Oeste	50%	50%	25%	50%	25%	50%	25%	25%	75%
Geometria (pers sudoeste)										
Desempenho (MW/h)	50,4	43,3	40,2	55,3	46,9	46,0	46,9	43,7	42,6	

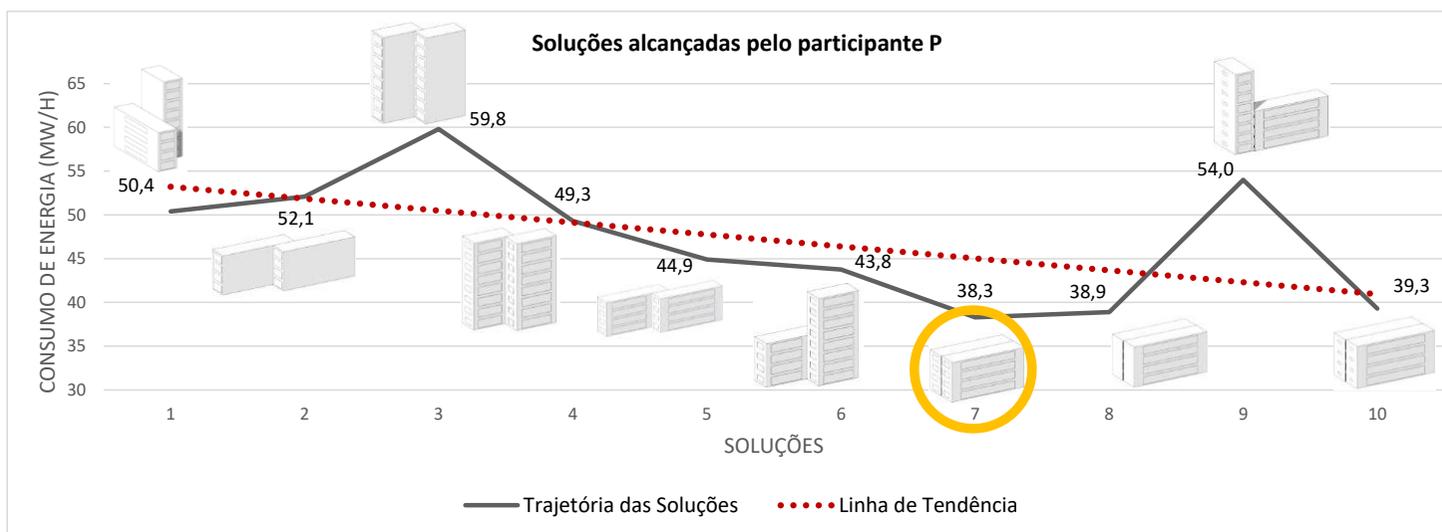


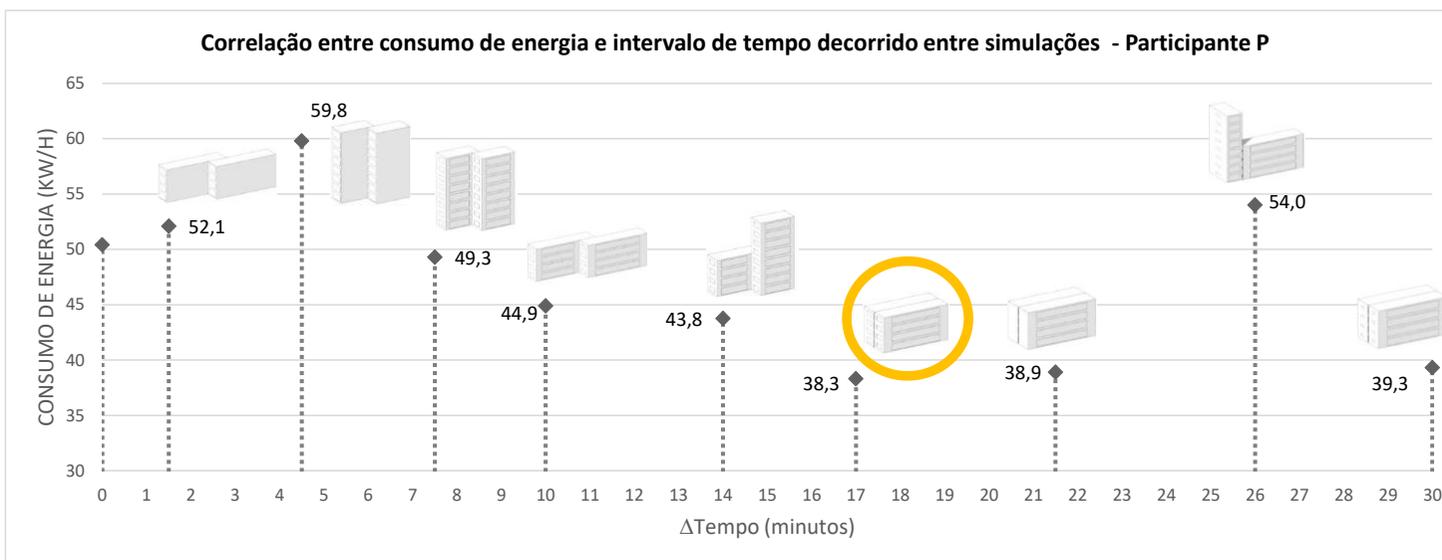
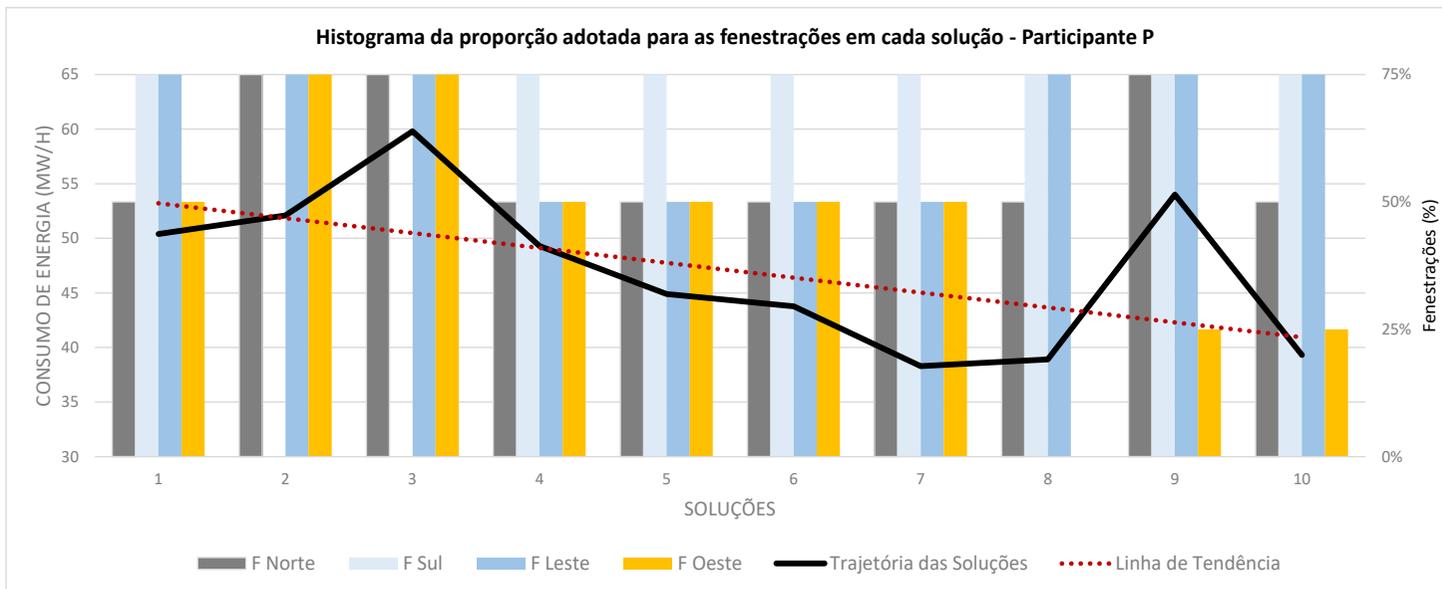


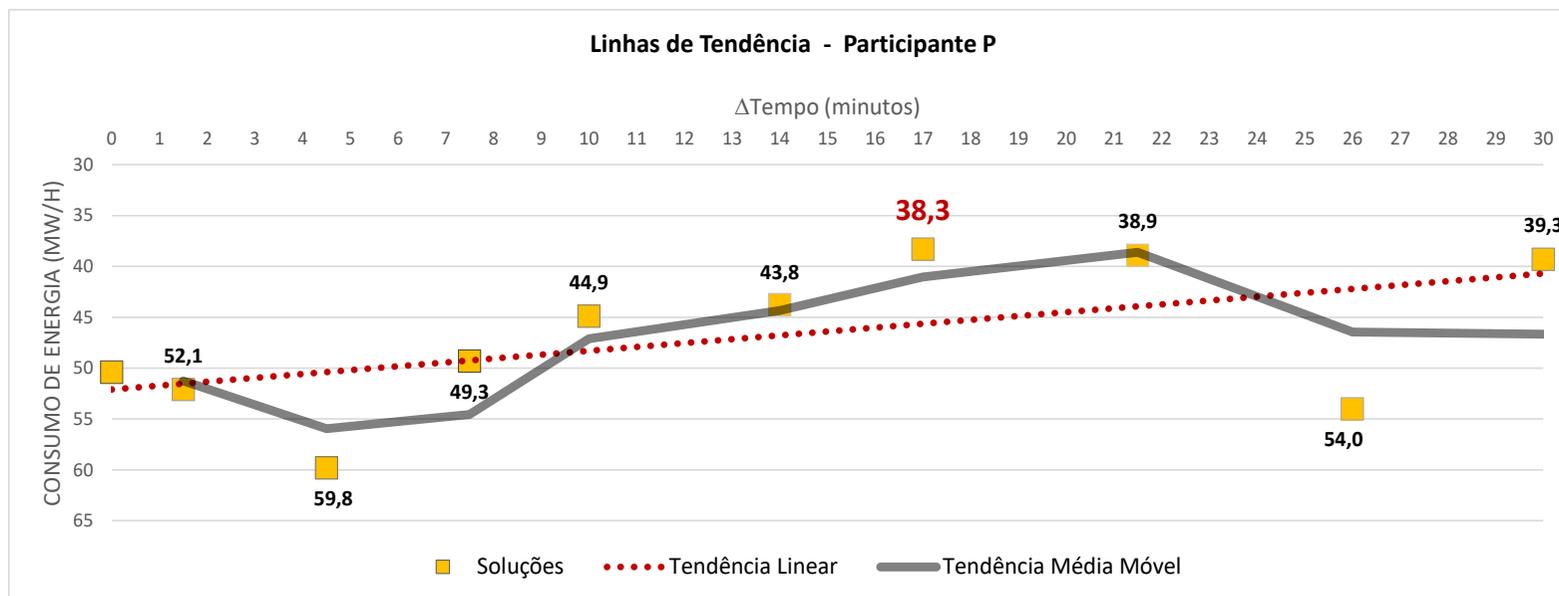
Participante P

Participante P 23anos 8º semestre
 Maquetes em etapas iniciais: pouco Softwares em etapas iniciais: SketchUp e Archicad Desempenho em etapas iniciais: insolação

PARÂMETROS	SOLUÇÕES									
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
Tempo (min.)	0	1,50	4,50	7,50	10,00	14,00	17,00	21,50	26,00	30,00
Fenestrções	F Norte	50%	75%	75%	50%	50%	50%	50%	75%	50%
	F Sul	75%	0%	0%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F Leste	75%	75%	75%	50%	50%	50%	75%	75%	75%
	F Oeste	50%	75%	75%	50%	50%	50%	0%	25%	25%
Geometria (pers sudoeste)										
Desempenho (MWh)	50,4	52,1	59,8	49,3	44,9	43,8	38,3	38,9	54,0	39,3



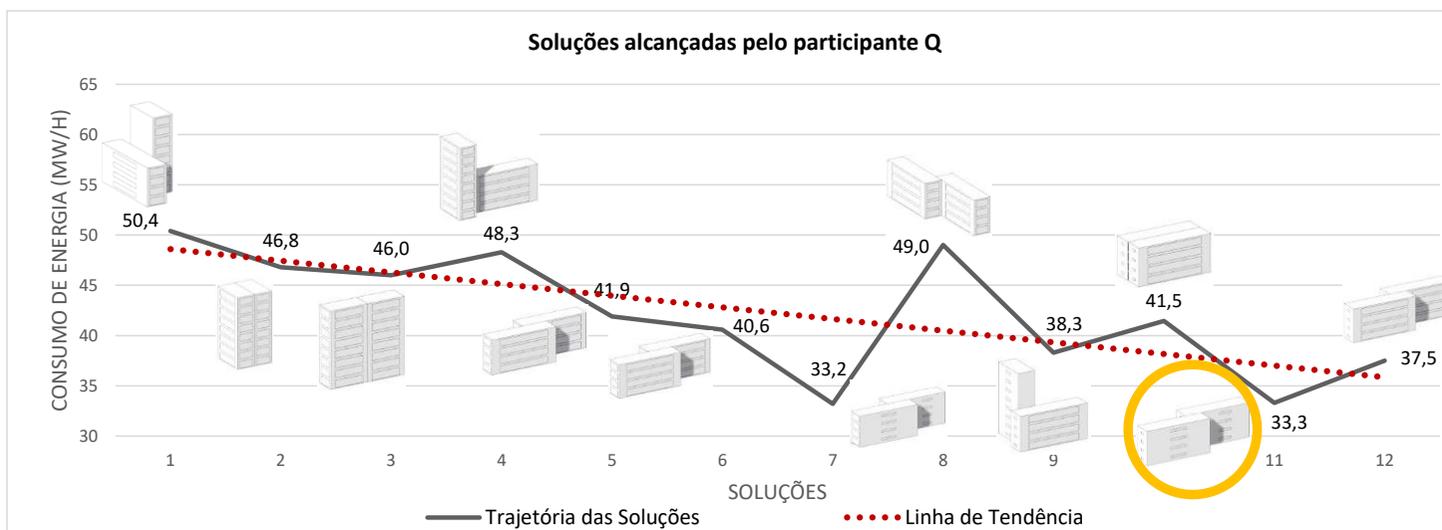


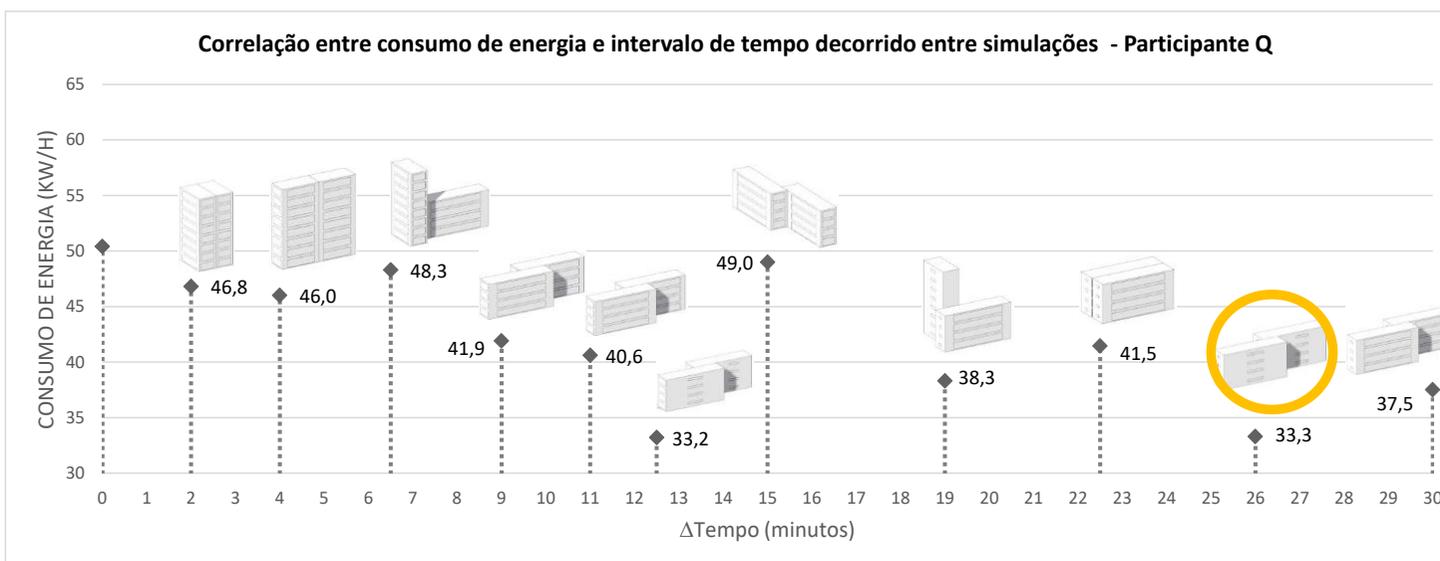
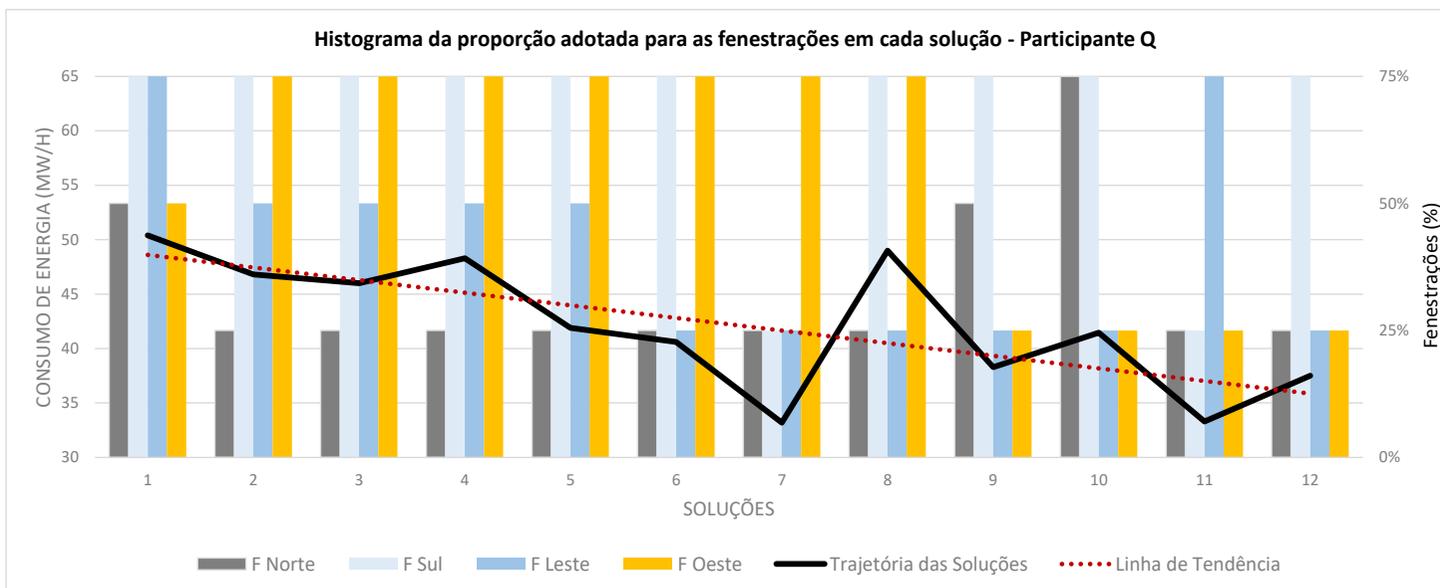


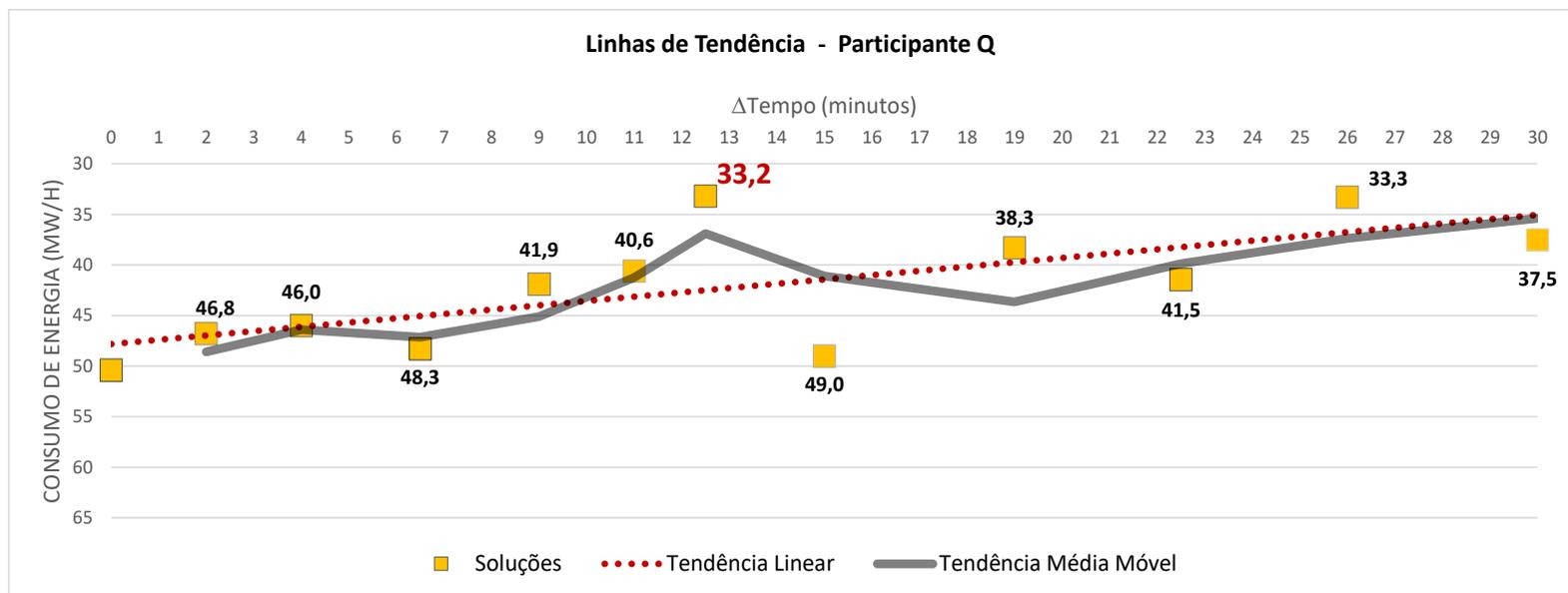
Participante Q

Participante Q 24anos 6º semestre
 Maquetes em etapas iniciais: pouco Softwares em etapas iniciais: SketchUp Desempenho em etapas iniciais: não

PARÂMETROS		SOLUÇÕES											
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°
Tempo (min.)		0	2,00	4,00	6,50	9,00	11,00	12,50	15,00	19,00	22,50	26,00	30,00
Fenestrções	F Norte	50%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	50%	75%	25%	25%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	75%	25%	75%	75%	75%	25%	75%
	F Leste	75%	50%	50%	50%	50%	25%	25%	25%	25%	25%	75%	25%
	F Oeste	50%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	25%	25%	25%	25%
Geometria (pers sudoeste)													
Desempenho (MWh)		50,4	46,8	46,0	48,3	41,9	40,6	33,2	49,0	38,3	41,5	33,3	37,5



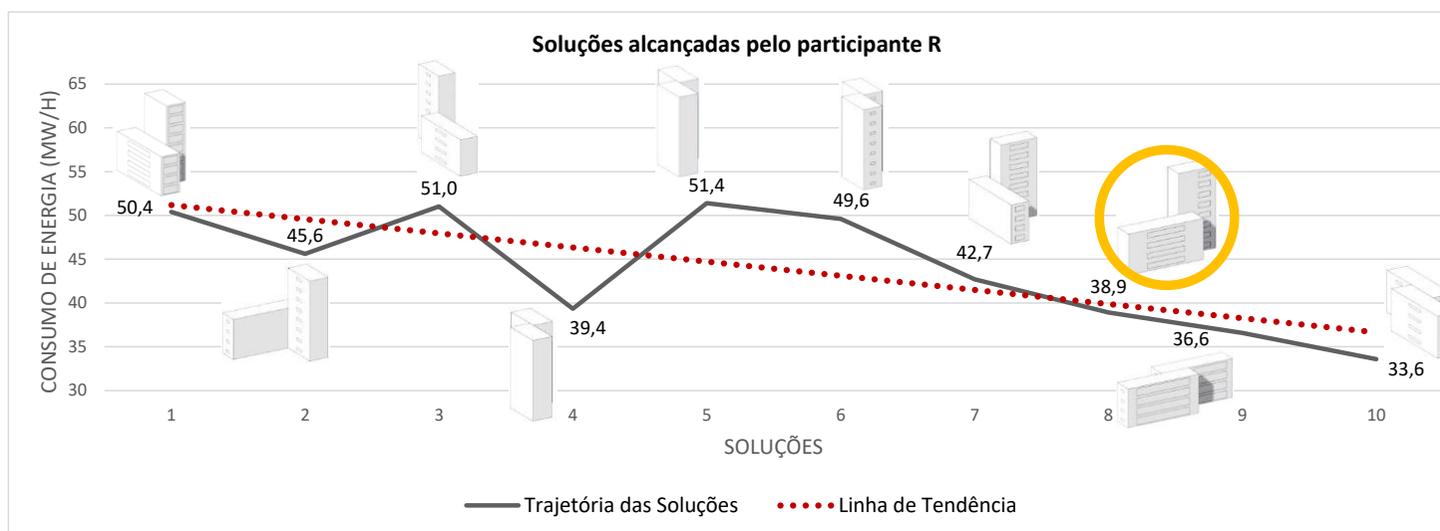


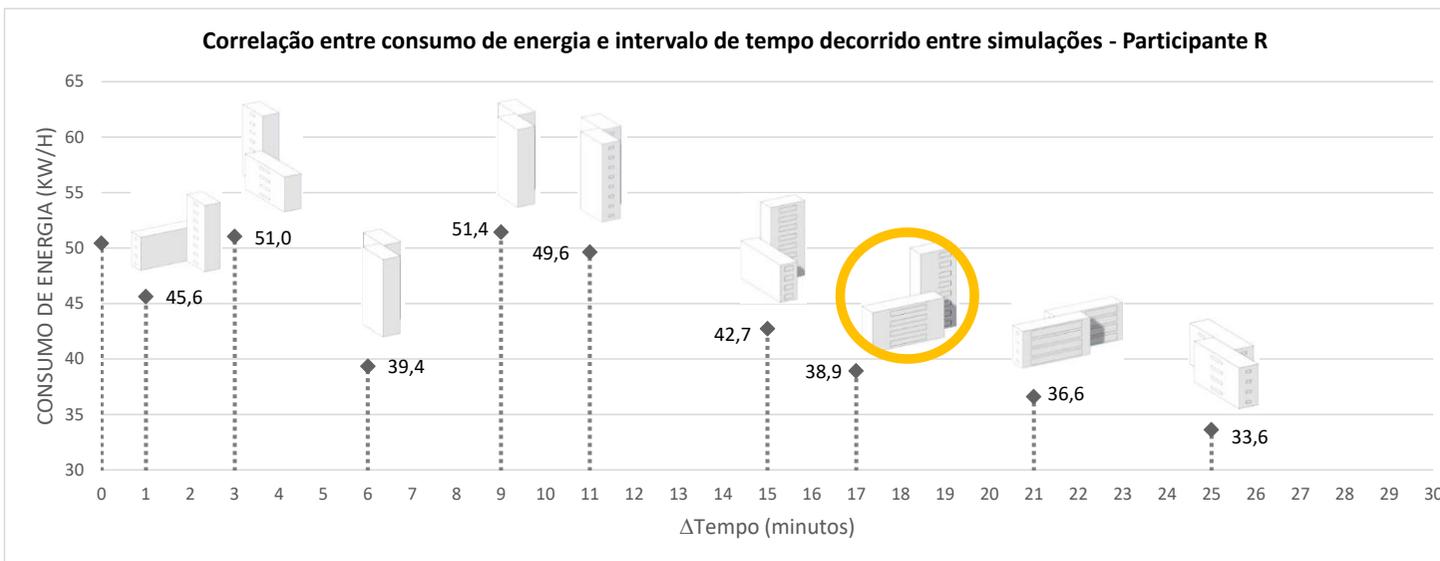
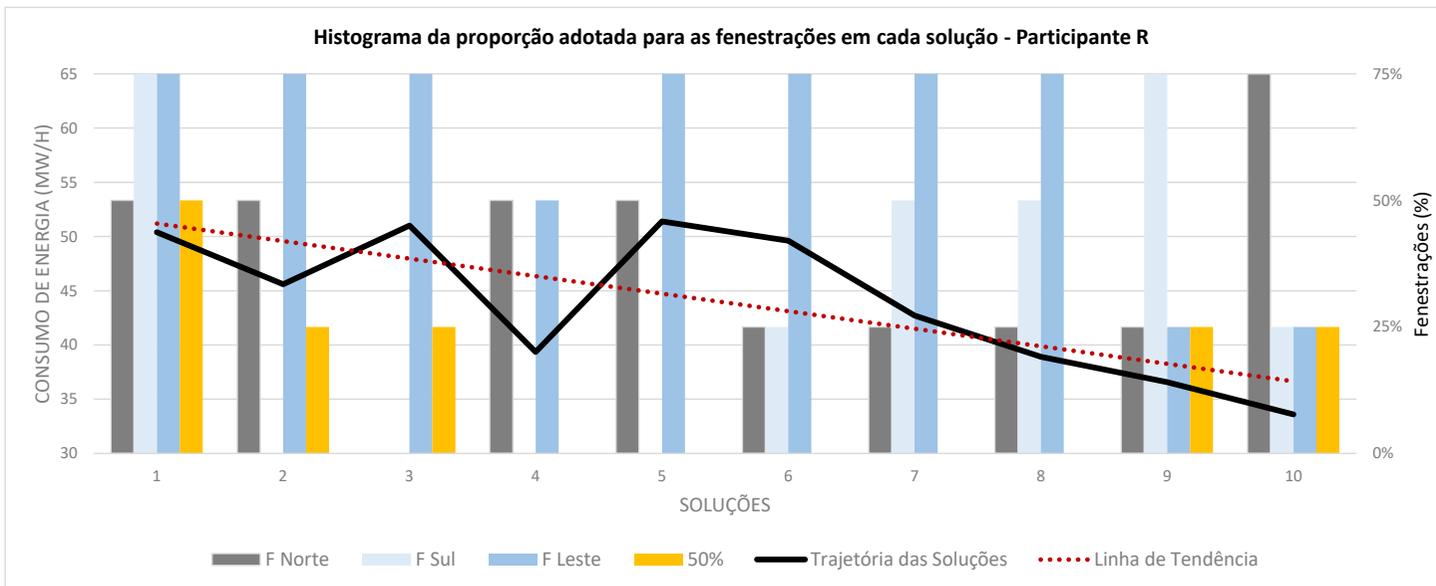


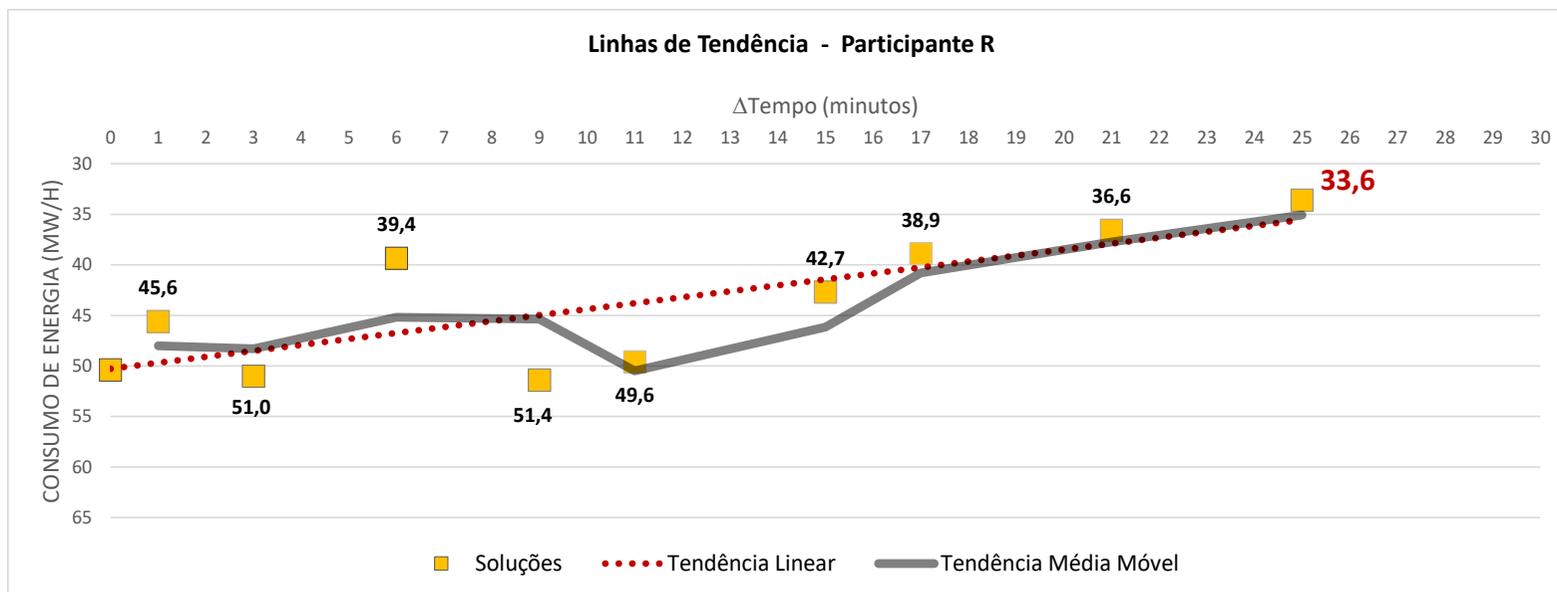
Participante R

Participante R 21anos 6º semestre
 Maquetes em etapas iniciais: nunca Softwares em etapas iniciais: Autocad e SketchUp Desempenho em etapas iniciais: insolação e iluminação

PARÂMETROS	SOLUÇÕES										
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	
Tempo (min.)	0	1,00	3,00	6,00	9,00	11,00	15,00	17,00	21,00	25,00	
Fenestrções	F Norte	50%	50%	0%	50%	50%	25%	25%	25%	25%	75%
	F Sul	75%	0%	0%	0%	0%	25%	50%	50%	75%	25%
	F Leste	75%	75%	75%	50%	75%	75%	75%	75%	25%	25%
	F Oeste	50%	25%	25%	0%	0%	0%	0%	0%	25%	25%
Geometria (pers sudoeste)											
Desempenho (MWh)	50,4	45,6	51,0	39,4	51,4	49,6	42,7	38,9	36,6	33,6	



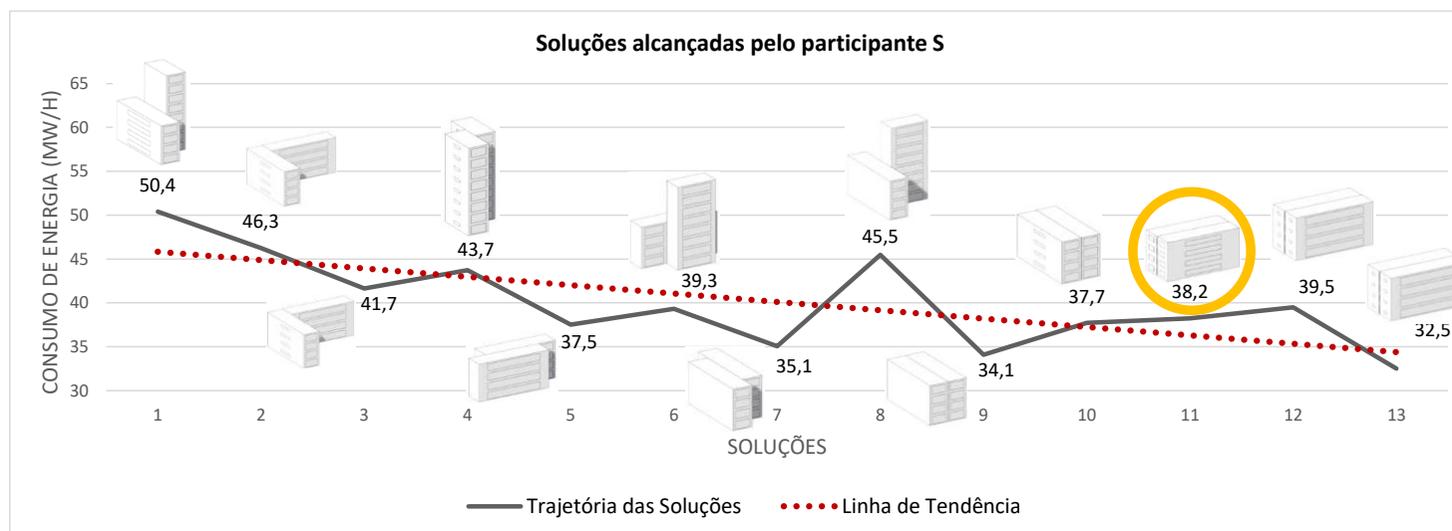


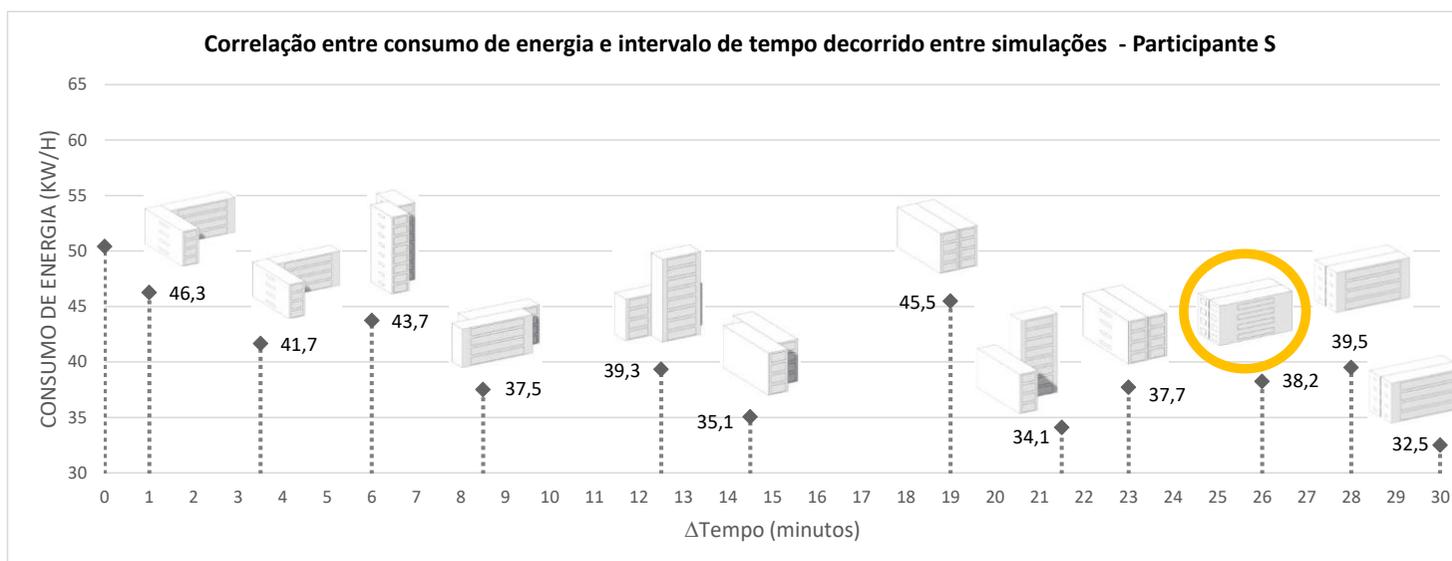
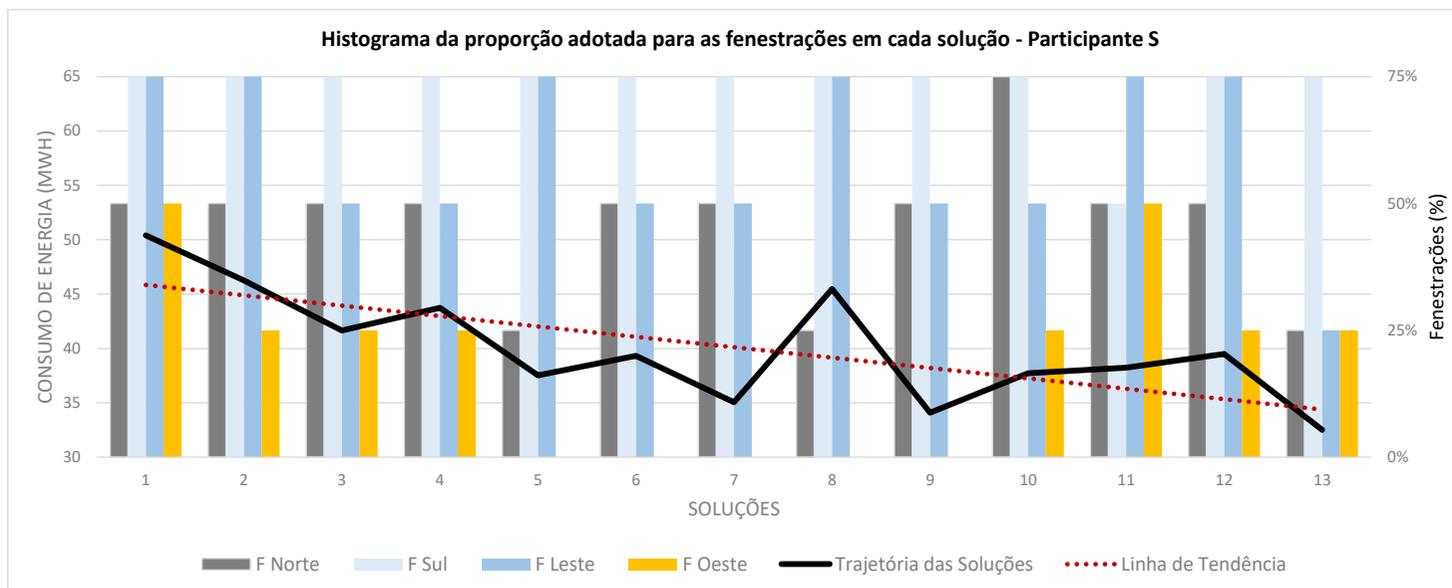


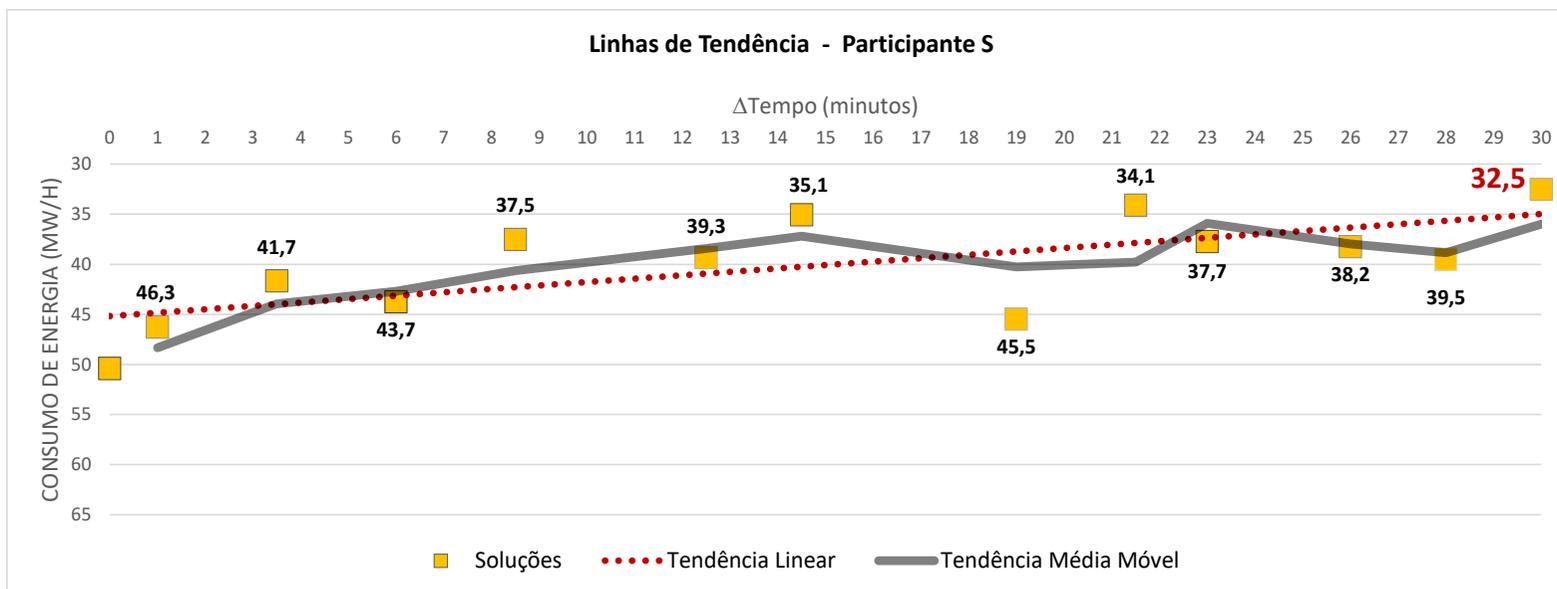
Participante S

Participante S 29anos 8º semestre
 Maquetes em etapas iniciais: pouco Softwares em etapas iniciais: SketchUp Desempenho em etapas iniciais: insolação

PARÂMETROS		SOLUÇÕES												
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°
Tempo (min.)		0	1,00	3,50	6,00	8,50	12,50	14,50	19,00	21,50	23,00	26,00	28,00	30,00
Fenestrações	F Norte	50%	50%	50%	50%	25%	50%	50%	25%	50%	75%	50%	50%	25%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	50%	75%	75%
	F Leste	75%	75%	50%	50%	75%	50%	50%	75%	50%	50%	75%	75%	25%
	F Oeste	50%	25%	25%	25%	0%	0%	0%	0%	0%	25%	50%	25%	25%
Geometria (pers sudoeste)														
Desempenho (MWh)		50,4	46,3	41,7	43,7	37,5	39,3	35,1	45,5	34,1	37,7	38,2	39,5	32,5



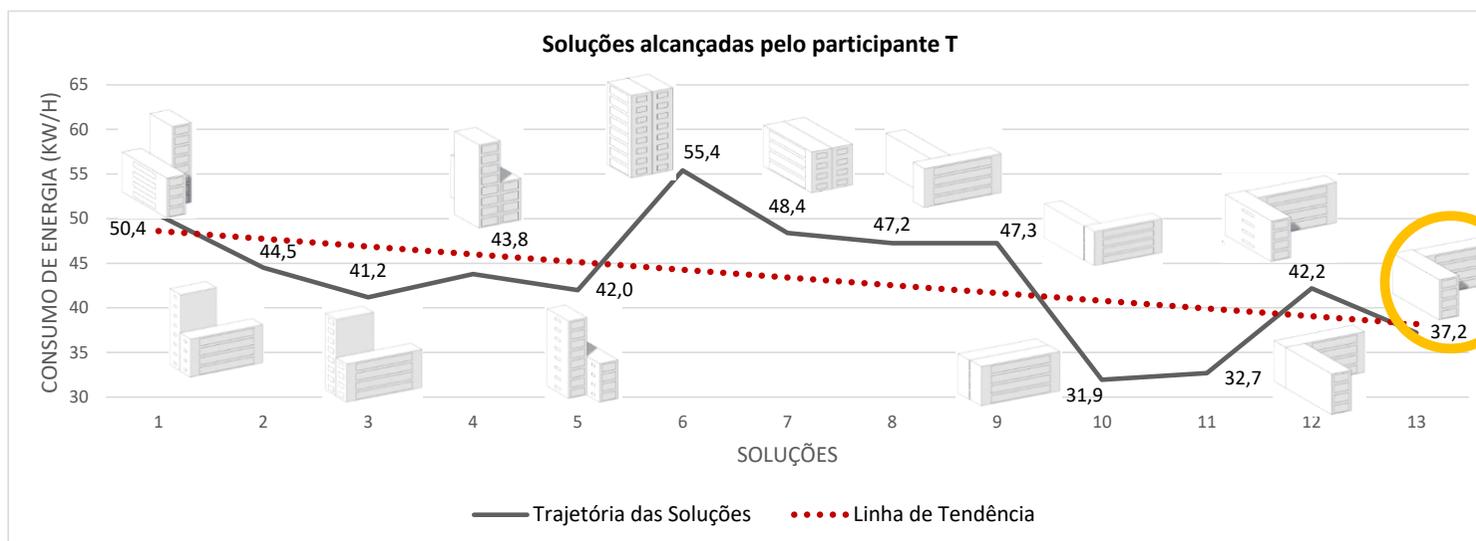


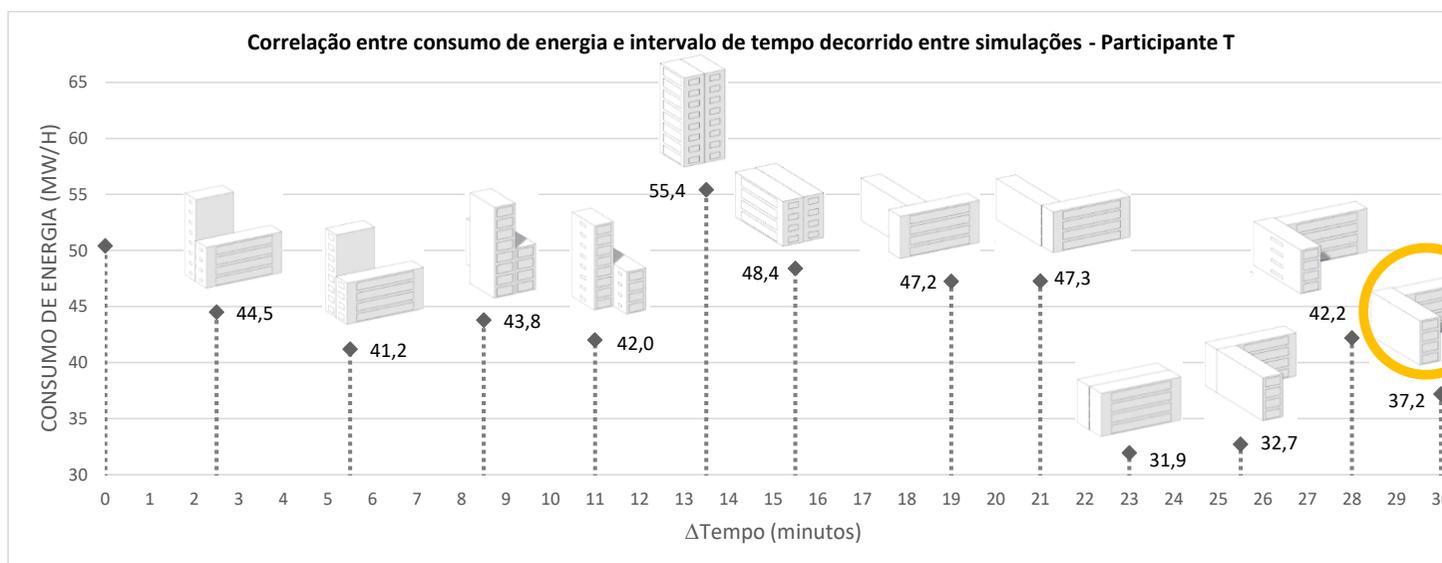
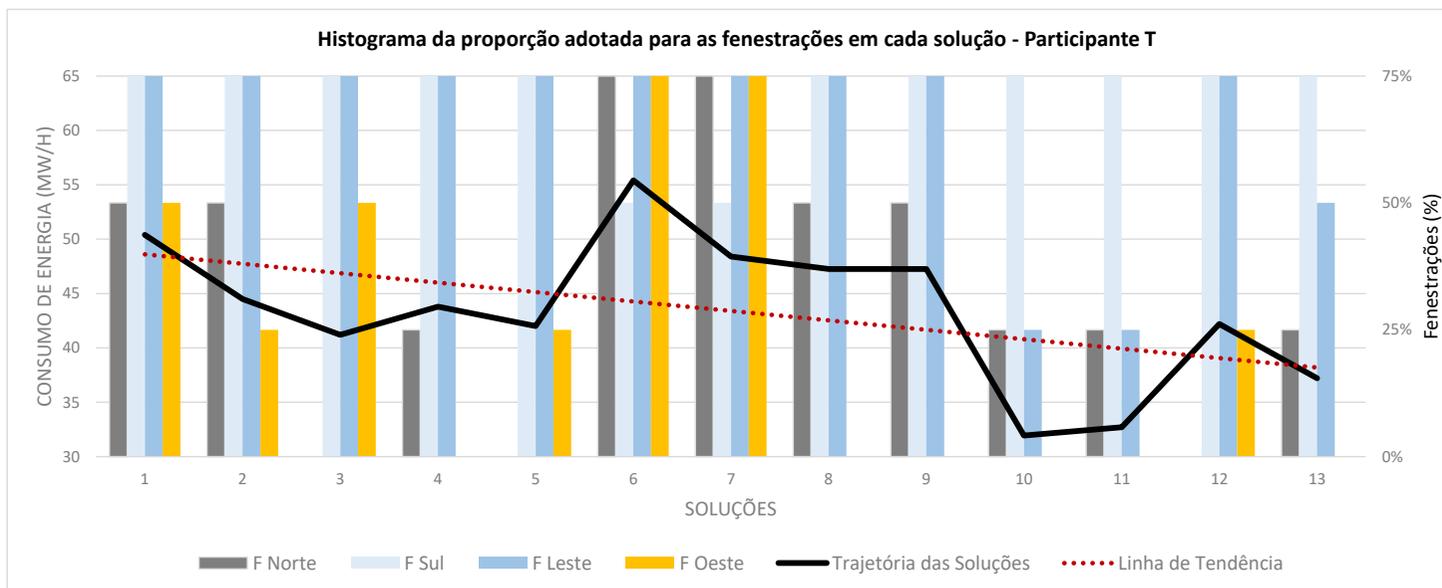


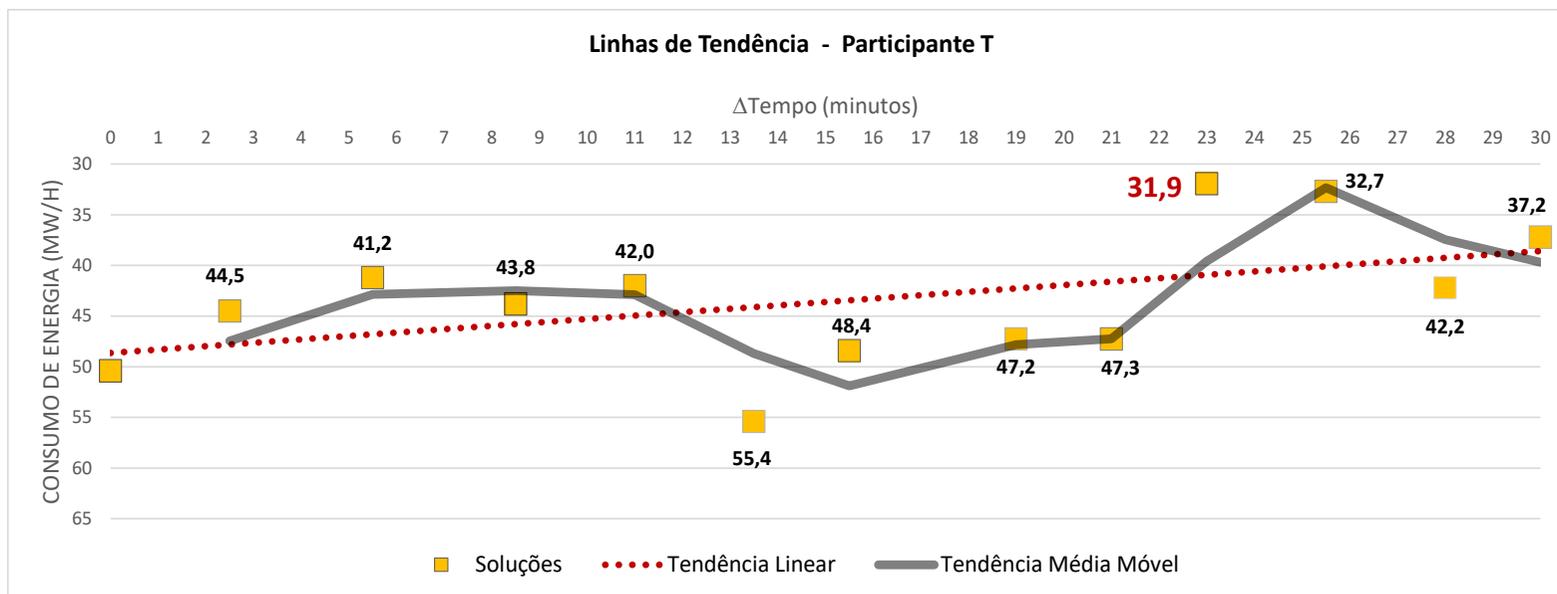
Participante T

Participante T 22anos 7º semestre
 Maquetes em etapas iniciais: pouco Softwares em etapas iniciais: SketchUp, Autocad e Archcad Desempenho em etapas iniciais: não
 Participante T 22anos 7º semestre

PARÂMETROS		SOLUÇÕES												
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°
Tempo (min.)		0	2,5	5,5	8,5	11,0	13,5	15,5	19,0	21,0	23,0	25,5	28,0	30,0
Fenestrações	F Norte	50%	50%	0%	25%	0%	75%	75%	50%	50%	25%	25%	0%	25%
	F Sul	75%	75%	75%	75%	75%	50%	50%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F Leste	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	25%	25%	75%	50%
	F Oeste	50%	25%	50%	0%	25%	75%	75%	0%	0%	0%	0%	25%	0%
Geometria (pers sudoeste)														
Desempenho (MWh)	50,4	44,5	41,2	43,8	42,0	55,4	48,4	47,2	47,3	31,9	32,7	42,2	37,2	







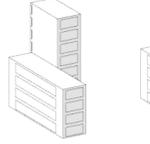
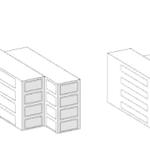
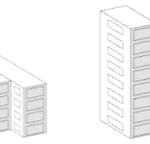
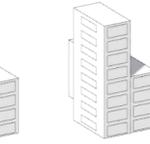
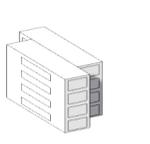
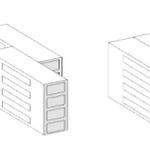
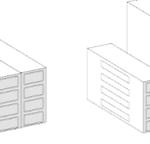
Participante U

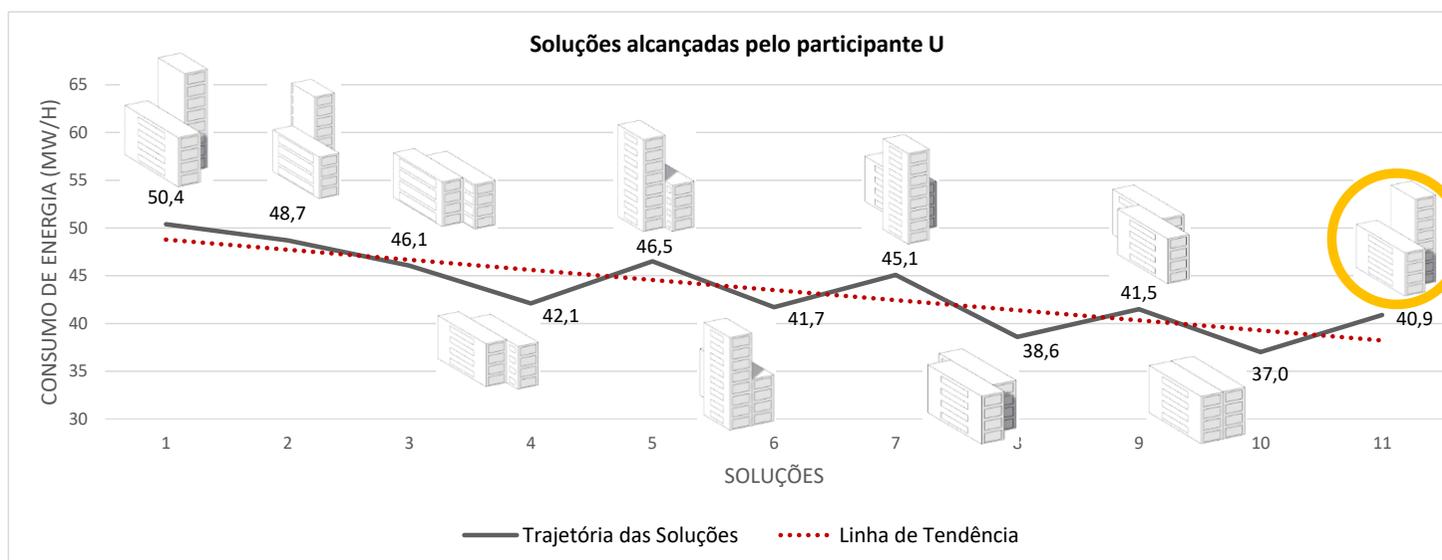
Participante U 26anos 9º semestre

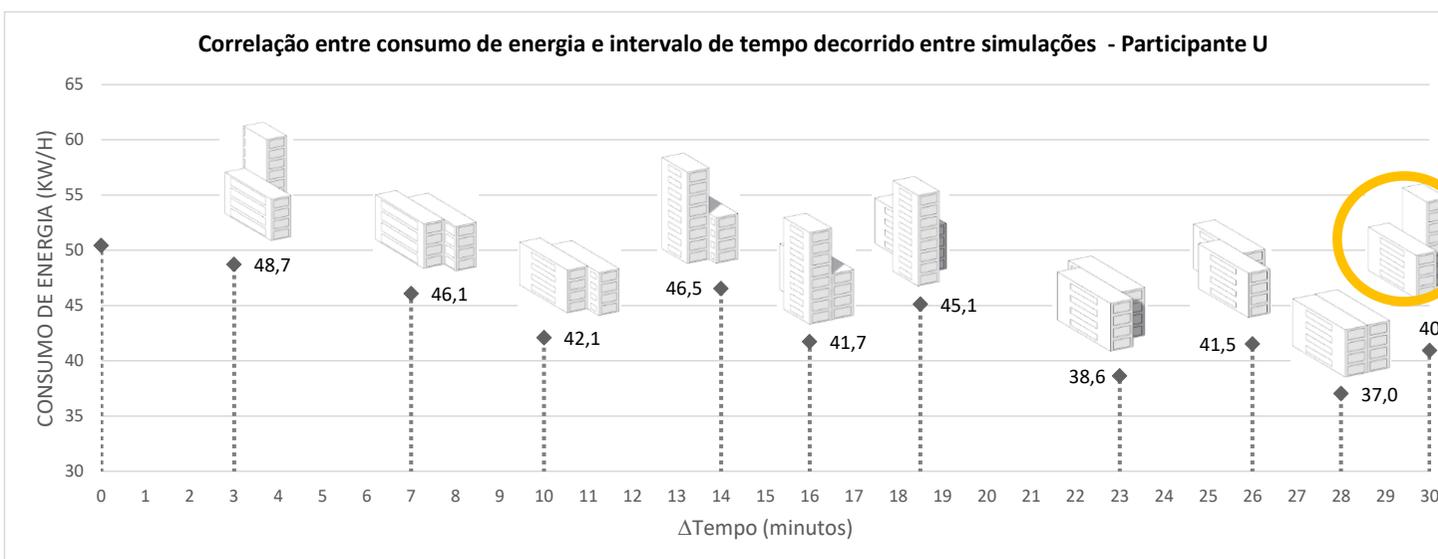
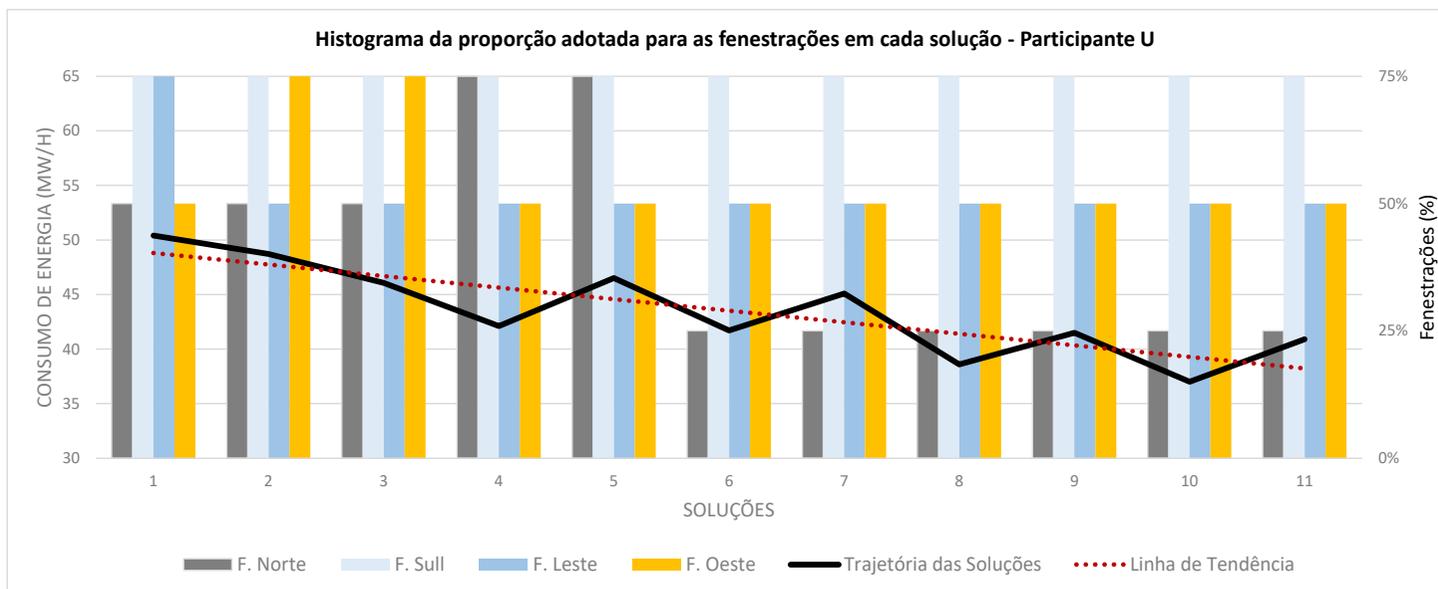
Maquetes em etapas iniciais: frequentemente

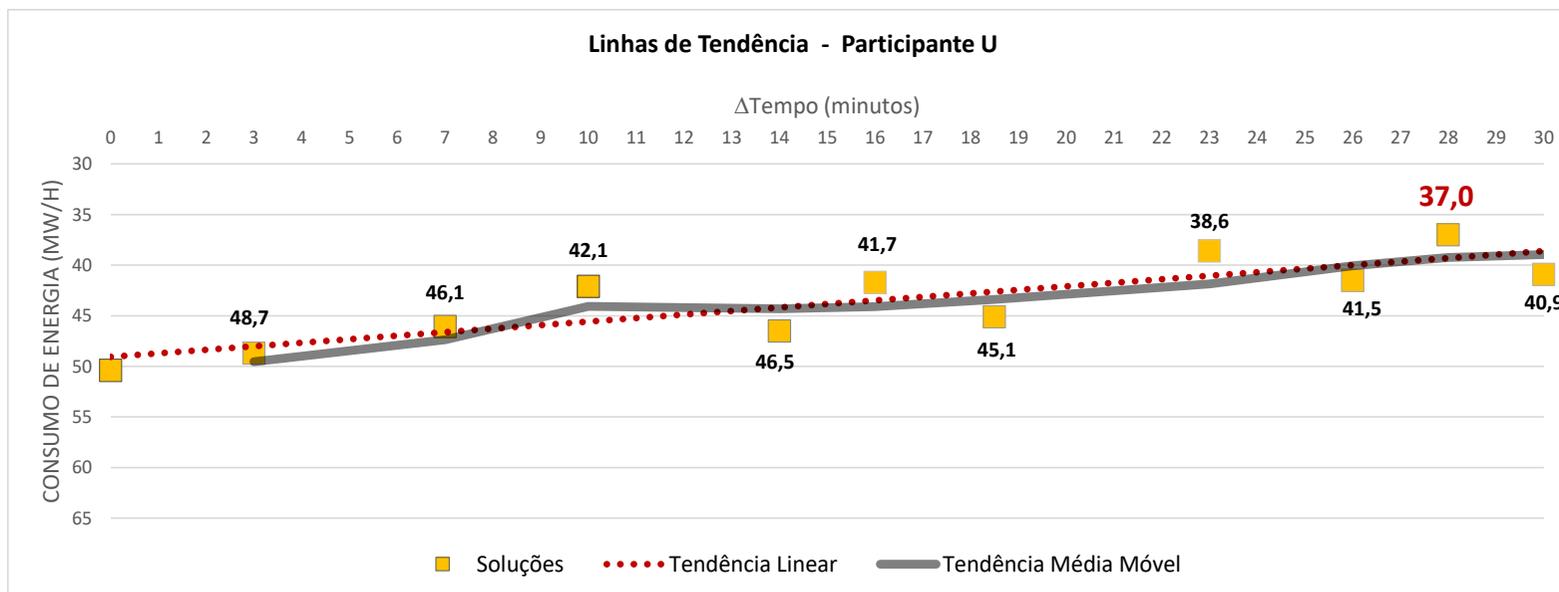
Softwares em etapas iniciais: SketchUp, Rhino e Archicad

Desempenho em etapas iniciais: não

PARÂMETROS	SOLUÇÕES											
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	
Tempo (min.)	0,0	3,0	7,0	10,0	14,0	16,0	18,5	23,0	26,0	28,0	30,0	
Fenestrações	F. Norte	50%	50%	50%	75%	75%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
	F. Sull	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
	F. Leste	75%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
	F. Oeste	50%	75%	75%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
Geometria (persp. sudoeste)												
Desempenho (MW/h)	50,4	48,7	46,1	42,1	46,5	41,7	45,1	38,6	41,5	37,0	40,9	







APÊNDICE G – MAPEAMENTO DAS AÇÕES DE PROJETO

Mapa de Procedimentos - Participante A		
Sequência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		45,7
2		50,6
3		47,4
4		53,8
5		55,1
6		52,8
7		45,4

Legenda	
Translação	
Rotacionação Eixo 'xy'	
Rotacionação Eixo 'yz'	
Aumento F. Norte	
Redução F. Norte	
Aumento F. Sul	
Redução F. Sul	
Aumento F. Leste	
Redução F. Leste	
Aumento F. Oeste	
Redução F. Oeste	

Mapa de Procedimentos - Participante B		
Sequência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		50,0
2		49,0
3		62,5
4		50,6
5		47,6
6		47,3
7		45,5
8		54,7
9		48,1
10		43,6

Legenda	
Translação	
Rotacionação Eixo 'xy'	
Rotacionação Eixo 'yz'	
Aumento F. Norte	
Redução F. Norte	
Aumento F. Sul	
Redução F. Sul	
Aumento F. Leste	
Redução F. Leste	
Aumento F. Oeste	
Redução F. Oeste	

Mapa de Procedimentos - Participante C		
Sequência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		36,9
2		41,2
3		43,2
4		44,6
5		47,0
6		36,9
7		42,7
8		45,2
9		40,2
10		36,5

Legenda	
Translação	
Rotacionação Eixo 'xy'	
Rotacionação Eixo 'yz'	
Aumento F. Norte	
Redução F. Norte	
Aumento F. Sul	
Redução F. Sul	
Aumento F. Leste	
Redução F. Leste	
Aumento F. Oeste	
Redução F. Oeste	

Mapa de Procedimentos - Participante D		
Sequência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		53,4
2		51,2
3		44,5
4		53,6
5		49,4
6		41,9
7		52,8
8		51,8
9		36,8
10		42,1
11		37,4
12		48,2
13		47,9

Legenda	
Translação	
Rotacionação Eixo 'xy'	
Rotacionação Eixo 'yz'	
Aumento F.Norte	
Redução F.Norte	
Aumento F.Sul	
Redução F.Sul	
Aumento F.Leste	
Redução F.Leste	
Aumento F.Oeste	
Redução F.Oeste	

Mapa de Procedimentos - Participante E		
Sequência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		46,8
2		54,3
3		37,4
4		43,2
5		41,8
6		39,4
7		39,1
8		56,4
9		49,2
10		34,2
11		41,8
12		40,7

Legenda	
Translação	
Rotacionação Eixo 'xy'	
Rotacionação Eixo 'yz'	
Aumento F.Norte	
Redução F.Norte	
Aumento F.Sul	
Redução F.Sul	
Aumento F.Leste	
Redução F.Leste	
Aumento F.Oeste	
Redução F.Oeste	

Mapa de Procedimentos - Participante F		
Sequência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		43,7
2		52,7
3		45,7
4		49,4
5		44,3
6		40,4
7		39,0

Legenda	
Translação	
Rotacionação Eixo 'xy'	
Rotacionação Eixo 'yz'	
Aumento F.Norte	
Redução F.Norte	
Aumento F.Sul	
Redução F.Sul	
Aumento F.Leste	
Redução F.Leste	
Aumento F.Oeste	
Redução F.Oeste	

Mapa de Procedimentos - Participante G		
Seqüência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		38,6
2		35,2
3		48,9
4		46,7
5		51,6
6		42,7
7		45,1
8		41,9

Legenda	
Translação	
Rotação Eixo 'xy'	
Rotação Eixo 'yz'	
Aumento F.Norte	
Redução F.Norte	
Aumento F.Sul	
Redução F.Sul	
Aumento F.Leste	
Redução F.Leste	
Aumento F.Oeste	
Redução F.Oeste	

Mapa de Procedimentos - Participante H		
Seqüência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		47,7
2		42,6
3		47,2
4		39,3
5		44,2
6		46,4
7		43,3
8		36,6
9		43,0
10		46,8
11		47,4
12		46,7

Legenda	
Translação	
Rotação Eixo 'xy'	
Rotação Eixo 'yz'	
Aumento F.Norte	
Redução F.Norte	
Aumento F.Sul	
Redução F.Sul	
Aumento F.Leste	
Redução F.Leste	
Aumento F.Oeste	
Redução F.Oeste	

Mapa de Procedimentos - Participante I		
Seqüência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		40,7
2		44,3
3		39,5
4		36,9
5		42,6
6		43,7
7		36,6
8		34,0
9		33,5
10		36,5
11		31,9

Legenda	
Translação	
Rotação Eixo 'xy'	
Rotação Eixo 'yz'	
Aumento F.Norte	
Redução F.Norte	
Aumento F.Sul	
Redução F.Sul	
Aumento F.Leste	
Redução F.Leste	
Aumento F.Oeste	
Redução F.Oeste	

Mapa de Procedimentos - Participante J

Sequência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		37,1
2		42,0
3		43,0
4		49,9
5		48,0
6		41,0
7		41,0
8		41,9
9		45,0

Legenda	
Translação	
Rotacionação Eixo 'xy'	
Rotacionação Eixo 'yz'	
Aumento F.Norte	
Redução F.Norte	
Aumento F.Sul	
Redução F.Sul	
Aumento F.Leste	
Redução F.Leste	
Aumento F.Oeste	
Redução F.Oeste	

Mapa de Procedimentos - Participante K

Sequência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		52,7
2		47,7
3		55,0
4		42,7
5		43,5
6		38,7

Legenda	
Translação	
Rotacionação Eixo 'xy'	
Rotacionação Eixo 'yz'	
Aumento F.Norte	
Redução F.Norte	
Aumento F.Sul	
Redução F.Sul	
Aumento F.Leste	
Redução F.Leste	
Aumento F.Oeste	
Redução F.Oeste	

Mapa de Procedimentos - Participante L

Sequência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		55,1
2		45,3
3		51,9
4		40,5
5		50,5
6		41,4
7		49,4
8		47,0
9		52,0

Legenda	
Translação	
Rotacionação Eixo 'xy'	
Rotacionação Eixo 'yz'	
Aumento F.Norte	
Redução F.Norte	
Aumento F.Sul	
Redução F.Sul	
Aumento F.Leste	
Redução F.Leste	
Aumento F.Oeste	
Redução F.Oeste	

Mapa de Procedimentos - Participante M		
Sequência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1	↔ ↻ ↔ ● ●	40,6
2	↔	44,6
3	↔ ↻ ↔ ↻ ↔ ● ■ ■	44,2
4	↻ ↔ ● ■ ●	46,6
5	↻ ↻ ↻ ■ ●	42,8
6	↔ ● ■	43,5
7	↻ ↻ ↻ ↻ ↔ ↻ ↻ ↻ ↻ ↻ ● ■ ● ↻ ↻ ■	45,3
8	↻ ↻ ● ■	44,2

Legenda	
Translação	↔
Rotação Eixo 'xy'	↻
Rotação Eixo 'yz'	↻
Aumento F.Norte	■
Redução F.Norte	●
Aumento F.Sul	■
Redução F.Sul	●
Aumento F.Leste	■
Redução F.Leste	●
Aumento F.Oeste	■
Redução F.Oeste	●

Mapa de Procedimentos - Participante N		
Sequência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1	↔ ↻ ↔ ■ ● ■ ● ● ● ● ●	53,4
2	■ ↔ ●	53,1
3	↻ ● ● ■ ●	44,1
4	↻ ↻ ↔ ↔	48,2
5	↻ ■ ●	44,1
6	●	40,1
7	↻ ↔ ↻ ↔ ■	51,8
8	↻ ↔ ↻ ↔ ↻ ↔ ● ■	47,9

Legenda	
Translação	↔
Rotação Eixo 'xy'	↻
Rotação Eixo 'yz'	↻
Aumento F.Norte	■
Redução F.Norte	●
Aumento F.Sul	■
Redução F.Sul	●
Aumento F.Leste	■
Redução F.Leste	●
Aumento F.Oeste	■
Redução F.Oeste	●

Mapa de Procedimentos - Participante O		
Sequência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1	↻ ↻ ● ● ■ ●	43,3
2	■ ● ● ●	40,2
3	■ ■ ● ■	55,3
4	↻ ↻ ↔ ● ■ ■ ●	46,9
5	↻ ↔ ● ● ● ■	46
6	↻ ↔ ■ ● ■	46,9
7	↔ ↻ ↔	43,7
8	■ ●	42,6

Legenda	
Translação	↔
Rotação Eixo 'xy'	↻
Rotação Eixo 'yz'	↻
Aumento F.Norte	■
Redução F.Norte	●
Aumento F.Sul	■
Redução F.Sul	●
Aumento F.Leste	■
Redução F.Leste	●
Aumento F.Oeste	■
Redução F.Oeste	●

Mapa de Procedimentos - Participante P		
Seqüência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		52,1
2		59,8
3		49,3
4		44,9
5		43,8
6		38,3
7		38,9
8		54,0
9		39,3

Legenda	
Translação	
Rotação Eixo 'xy'	
Rotação Eixo 'yz'	
Aumento F.Norte	
Redução F.Norte	
Aumento F.Sul	
Redução F.Sul	
Aumento F.Leste	
Redução F.Leste	
Aumento F.Oeste	
Redução F.Oeste	

Mapa de Procedimentos - Participante Q		
Seqüência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		46,8
2		46,0
3		48,3
4		41,9
5		40,6
6		33,2
7		49,0
8		38,3
9		41,5
10		33,3
11		37,5

Legenda	
Translação	
Rotação Eixo 'xy'	
Rotação Eixo 'yz'	
Aumento F.Norte	
Redução F.Norte	
Aumento F.Sul	
Redução F.Sul	
Aumento F.Leste	
Redução F.Leste	
Aumento F.Oeste	
Redução F.Oeste	

Mapa de Procedimentos - Participante R		
Seqüência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		45,6
2		51,0
3		39,4
4		51,4
5		49,6
6		42,7
7		38,9
8		36,6
9		33,6

Legenda	
Translação	
Rotação Eixo 'xy'	
Rotação Eixo 'yz'	
Aumento F.Norte	
Redução F.Norte	
Aumento F.Sul	
Redução F.Sul	
Aumento F.Leste	
Redução F.Leste	
Aumento F.Oeste	
Redução F.Oeste	

Mapa de Procedimentos - Participante S		
Seqüência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		46,3
2		41,7
3		43,7
4		37,5
5		39,3
6		35,1
7		45,5
8		34,1
9		37,7
10		38,2
11		39,5
12		32,5

Legenda	
Translação	
Rotação Eixo 'xy'	
Rotação Eixo 'yz'	
Aumento F. Norte	
Redução F. Norte	
Aumento F. Sul	
Redução F. Sul	
Aumento F. Leste	
Redução F. Leste	
Aumento F. Oeste	
Redução F. Oeste	

Mapa de Procedimentos - Participante S		
Seqüência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		46,3
2		41,7
3		43,7
4		37,5
5		39,3
6		35,1
7		45,5
8		34,1
9		37,7
10		38,2
11		39,5
12		32,5

Legenda	
Translação	
Rotação Eixo 'xy'	
Rotação Eixo 'yz'	
Aumento F. Norte	
Redução F. Norte	
Aumento F. Sul	
Redução F. Sul	
Aumento F. Leste	
Redução F. Leste	
Aumento F. Oeste	
Redução F. Oeste	

Mapa de Procedimentos - Participante U		
Seqüência	Ações Projetuais	Consumo (MWh)
1		48,7
2		46,1
3		42,1
4		46,5
5		41,7
6		45,1
7		38,6
8		41,5
9		37,0
10		40,9

Legenda	
Translação	
Rotação Eixo 'xy'	
Rotação Eixo 'yz'	
Aumento F. Norte	
Redução F. Norte	
Aumento F. Sul	
Redução F. Sul	
Aumento F. Leste	
Redução F. Leste	
Aumento F. Oeste	
Redução F. Oeste	

APÊNDICE H – RELAÇÃO TOTAL DE SIMULAÇÕES REALIZADAS PELA AMOSTRA DURANTE EXERCÍCIO DE PROJETO

Ref	CE (MWh)	Amostra
1	31,9	Participante I
2	31,9	Participante T
3	32,5	Participante S
4	32,7	Participante T
5	33,2	Participante Q
6	33,3	Participante Q
7	33,5	Participante I
8	33,6	Participante R
9	34,0	Participante I
10	34,1	Participante S
11	34,2	Participante E
12	35,1	Participante S
13	35,2	Participante G
14	36,5	Participante C
15	36,5	Participante I
16	36,6	Participante R
17	36,6	Participante I
18	36,6	Participante H
19	36,8	Participante D
20	36,9	Participante C
21	36,9	Participante I
22	36,9	Participante C
23	37,0	Participante U
24	37,1	Participante J
25	37,2	Participante T
26	37,4	Participante E
27	37,4	Participante D
28	37,5	Participante Q
29	37,5	Participante H
30	37,7	Participante H
31	38,2	Participante H
32	38,3	Participante P
33	38,3	Participante Q
34	38,6	Participante G
35	38,6	Participante U

Ref	CE (MWh)	Amostra
36	38,7	Participante K
37	38,9	Participante P
38	38,9	Participante R
39	39,0	Participante F
40	39,1	Participante E
41	39,3	Participante H
42	39,3	Participante P
43	39,3	Participante S
44	39,4	Participante R
45	39,4	Participante E
46	39,5	Participante S
47	39,5	Participante I
48	40,1	Participante N
49	40,2	Participante O
50	40,2	Participante C
51	40,4	Participante F
52	40,5	Participante L
53	40,6	Participante M
54	40,6	Participante Q
55	40,7	Participante I
56	40,7	Participante E
57	40,9	Participante U
58	41,0	Participante J
59	41,0	Participante J
60	41,2	Participante C
61	41,2	Participante T
62	41,4	Participante L
63	41,5	Participante Q
64	41,5	Participante U
65	41,7	Participante S
66	41,7	Participante U
67	41,8	Participante E
68	41,8	Participante E
69	41,9	Participante Q
70	41,9	Participante D

Ref	CE (MWh)	Amostra
71	41,9	Participante G
72	41,9	Participante J
73	42,0	Participante J
74	42,0	Participante T
75	42,1	Participante U
76	42,1	Participante D
77	42,2	Participante T
78	42,6	Participante H
79	42,6	Participante I
80	42,6	Participante O
81	42,7	Participante K
82	42,7	Participante G
83	42,7	Participante K
84	42,7	Participante C
85	42,8	Participante M
86	43,0	Participante J
87	43,0	Participante H
88	43,2	Participante C
89	43,2	Participante E
90	43,3	Participante O
91	43,3	Participante H
92	43,5	Participante K
93	43,5	Participante M
94	43,6	Participante B
95	43,7	Participante F
96	43,7	Participante I
97	43,7	Participante O
98	43,7	Participante S
99	43,8	Participante P
100	43,8	Participante T
101	44,1	Participante N
102	44,1	Participante N
103	44,2	Participante M
104	44,2	Participante H
105	44,2	Participante M
106	44,3	Participante I
107	44,3	Participante F
108	44,5	Participante T
109	44,5	Participante D
110	44,6	Participante M

Ref	CE (MWh)	Amostra
111	44,6	Participante C
112	44,7	Participante B
113	44,9	Participante P
114	45,0	Participante J
115	45,1	Participante U
116	45,1	Participante G
117	45,2	Participante C
118	45,3	Participante L
119	45,3	Participante M
120	45,4	Participante A
121	45,5	Participante S
122	45,5	Participante B
123	45,6	Participante R
124	45,7	Participante A
125	45,7	Participante F
126	46,0	Participante Q
127	46,0	Participante O
128	46,1	Participante U
129	46,3	Participante S
130	46,4	Participante H
131	46,5	Participante U
132	46,6	Participante M
133	46,7	Participante G
134	46,7	Participante H
135	46,8	Participante E
136	46,8	Participante Q
137	46,8	Participante H
138	46,9	Participante O
139	46,9	Participante O
140	47,0	Participante C
141	47,0	Participante L
142	47,2	Participante H
143	47,2	Participante T
144	47,3	Participante T
145	47,3	Participante B
146	47,4	Participante A
147	47,4	Participante H
148	47,6	Participante B
149	47,7	Participante H
150	47,7	Participante K

Ref	CE (MWh)	Amostra
151	47,9	Participante D
152	47,9	Participante N
153	48,0	Participante J
154	48,1	Participante B
155	48,2	Participante N
156	48,2	Participante D
157	48,3	Participante Q
158	48,4	Participante T
159	48,7	Participante U
160	48,9	Participante G
161	49,0	Participante Q
162	49,2	Participante E
163	49,3	Participante P
164	49,4	Participante F
165	49,4	Participante D
166	49,4	Participante L
167	49,6	Participante R
168	49,8	Participante B
169	49,9	Participante J
170	50,0	Participante B
171	50,5	Participante L
172	50,6	Participante A
173	50,6	Participante B
174	51,0	Participante R
175	51,2	Participante D
176	51,4	Participante R

Ref	CE (MWh)	Amostra
177	51,6	Participante G
178	51,8	Participante N
179	51,8	Participante D
180	51,9	Participante L
181	52,0	Participante L
182	52,1	Participante P
183	52,7	Participante K
184	52,7	Participante F
185	52,8	Participante A
186	52,8	Participante D
187	53,1	Participante N
188	53,4	Participante D
189	53,4	Participante N
190	53,6	Participante D
191	53,8	Participante A
192	54,0	Participante P
193	54,3	Participante E
194	55,0	Participante K
195	55,1	Participante L
196	55,1	Participante A
197	55,3	Participante O
198	55,4	Participante T
199	56,4	Participante E
200	59,8	Participante P
201	62,5	Participante B

APÊNDICE I – SIMULAÇÕES REALIZADAS INDIVIDUALMENTE PELOS PARTICIPANTES

PARTICIPANTES	SIMULAÇÕES													
Participante A														
Desempenho (MWh)	50,4	45,7	50,6	47,4	53,8	55,1	52,8	45,4						
Participante B														
Desempenho (MWh)	50,4	50,0	49,8	62,5	50,6	47,6	47,3	45,5	54,7	48,1	43,6			
Participante C														
Desempenho (MWh)	50,4	36,9	41,2	43,2	44,6	47,0	36,9	42,7	45,2	40,2	36,5			
Participante D														
Desempenho (MWh)	50,4	53,4	51,2	44,5	53,6	49,4	41,9	52,8	51,8	36,8	42,1	37,4	48,2	47,9
Participante E														
Desempenho (MWh)	50,4	46,8	54,3	37,4	43,2	41,8	39,4	39,1	56,4	49,2	34,2	41,8	40,7	
Participante F														
Desempenho (MWh)	50,4	43,7	52,7	45,7	49,4	44,3	40,4	39,0						
Participante G														
Desempenho (MWh)	50,4	38,6	35,2	48,9	46,7	51,6	42,7	45,1	41,9					
Participante H														
Desempenho (MWh)	50,4	47,7	42,6	47,2	39,3	44,2	46,4	43,3	36,6	43,0	46,8	47,4	46,7	
Participante I														
Desempenho (MWh)	50,4	40,7	44,3	39,5	36,9	42,6	43,7	36,6	34,0	33,5	36,5	31,9		
Participante J														
Desempenho (MWh)	50,4	37,1	42,0	43,0	49,9	48,0	41,0	41,0	41,9	45,0				
Participante K														
Desempenho (MWh)	50,4	52,7	47,7	55,0	42,7	43,5	38,7							
Participante L														
Desempenho (MWh)	50,4	55,1	45,3	51,9	40,5	50,5	41,4	49,4	47,0	52,0				
Participante M														
Desempenho (MWh)	50,4	40,6	44,6	44,2	46,6	42,8	43,5	45,3	44,2					
Participante N														
Desempenho (MWh)	50,4	53,4	53,1	44,1	48,2	44,1	40,1	51,8	47,9					
Participante O														
Desempenho (MWh)	50,4	43,3	40,2	55,3	46,9	46,0	46,9	43,7	42,6					
Participante P														
Desempenho (MWh)	50,4	52,1	59,8	49,3	44,9	43,8	38,3	38,9	54,0	39,3				
Participante Q														
Desempenho (MWh)	50,4	46,8	46,0	48,3	41,9	40,6	33,2	49,0	38,3	41,5	33,3	37,5		
Participante R														
Desempenho (MWh)	50,4	45,6	51,0	39,4	51,4	49,6	42,7	38,9	36,6	33,6				
Participante S														
Desempenho (MWh)	50,4	46,3	41,7	43,7	37,5	39,3	35,1	45,5	34,1	37,7	38,2	39,5	32,5	
Participante T														
Desempenho (MWh)	50,4	44,5	41,2	43,8	42,0	55,4	48,4	47,2	47,3	31,9	32,7	42,2	37,2	
Participante U														
Desempenho (MWh)	50,4	48,7	46,1	42,1	46,5	41,7	45,1	38,6	41,5	37,0	40,9			