

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAU
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PPG/FAU

**CASA ZERO: DIRETRIZES DE PROJETO PARA CASAS PRÉ-FABRICADAS
DE BALANÇO ENERGÉTICO NULO EM BRASÍLIA**

Larissa Olivier Sudbrack

Dissertação de mestrado

BRASÍLIA
2017

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAU
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PPG/FAU

**CASA ZERO: DIRETRIZES DE PROJETO PARA CASAS PRÉ-FABRICADAS
DE BALANÇO ENERGÉTICO NULO EM BRASÍLIA**

Larissa Olivier Sudbrack

Dissertação de mestrado

BRASÍLIA

2017

Larissa Olivier Sudbrack

**CASA ZERO: DIRETRIZES DE PROJETO PARA CASAS PRÉ-FABRICADAS
DE BALANÇO ENERGÉTICO NULO EM BRASÍLIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Profa. Dra. Cláudia N. D. Amorim

BRASÍLIA

2017

SSU943 c	Sudbrack, Larissa Olivier Casa Zero: Diretrizes de projeto para casas pré-fabricadas de balanço energético nulo em Brasília / Larissa Olivier Sudbrack - Brasília, 2017 240 p. : il Orientador: Cláudia Naves David Amorim Monografia (Especialização - Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de Brasília, 2017. 1. Balanço energético nulo. 2. Casa pré fabricada. 3. Produção fotovoltaica residencial. I. Naves David Amorim, Cláudia, orient. II. Título
-------------	---

Larissa Olivier Sudbrack

**CASA ZERO: DIRETRIZES DE PROJETO PARA CASAS PRÉ-FABRICADAS
DE BALANÇO ENERGÉTICO NULO EM BRASÍLIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Profa. Dra. Cláudia Naves David Amorim

Área de concentração: Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade.
Data da defesa: 15/08/2017

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Cláudia Naves David Amorim (1º membro – presidente)
Universidade de Brasília

Prof. Dr. Jaime Gonçalves de Almeida (2º membro)
Universidade de Brasília

Prof. Dr. João Manoel Dias Pimenta (3º membro)
Universidade de Brasília

Prof. Dr. Caio Frederico e Silva (suplente)
Universidade de Brasília

AGRADECIMENTOS

À professora Cláudia Naves David Amorim, pela atenção, experiência, sabedoria e profissionalismo. A ela devo minha iniciação científica, e o retorno a academia. Agradeço também pela amizade, por me orientar em mais um trabalho, e por insistir que eu dê sempre o melhor de mim.

Ao meu marido Paulo, pelo carinho, compreensão e paciência. Por sua capacidade de me trazer paz na correria de cada semestre, cada artigo, cada etapa. Por sempre acreditar em mim, me apoiar, e por não me deixar desistir. Aqui estamos nós, finalizando mais uma etapa juntos! Te amo pra sempre.

Aos meus pais, por serem meu maior exemplo. À minha mãe, pela paixão à vida acadêmica e à doce docência; ao meu pai, pela paixão pelas questões práticas e pelo “setor elétrico”. A vocês dois, meu muito obrigada por me ensinarem a não medir esforços para atingir um objetivo, e que a felicidade só depende de nós. Aos meus irmãos, amigos e familiares pela paciência e compreensão da ausência em tantos momentos, tanto os felizes quanto os mais difíceis. À minha avó por sempre se orgulhar, e torcer por mim.

Ao meu sócio e amigo Gustavo Costa, pela motivação constante em me fazer crescer e me incentivar sempre. Obrigada pela inspiração para o tema deste trabalho! Quem sabe um dia vamos pôr em prática nosso sonho das casas pré fabricadas.

Ao professor Caio Frederico e Silva, pela amizade de tantos anos, pelas respostas imediatas aos e-mails desesperados no meio da noite, transformando as dúvidas e incertezas em dicas e inspirações. À professora Luciana Saboia pela deliciosa experiência de docência no PA1, e por me fazer acreditar que unir academia e escritório era possível.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade em avaliar e contribuir com este trabalho.

Aos colegas de curso e do LACAM, pela troca de experiências e pelos momentos prazerosos. Em especial ao João Francisco, que me ajudou a lembrar o Design Builder. E aos incríveis professores ao longo do curso, com quem tanto aprendi.

Obrigada!

“A ausência da dúvida mata o pensamento.”

Edgar Graeff

RESUMO

A Eficiência Energética nasceu em um contexto de crise e de elevações tarifárias e permanece atual em razão do sucesso das ferramentas legais e do avanço tecnológico relacionados ao tema. As edificações representam 47,6% da energia elétrica consumida no país, e o potencial de economia deste setor é expressivo. Os edifícios residenciais de balanço energético nulo (*Net Zero Energy Building* - NZEB) aliados à pré fabricação tem recebido atenção crescente no cenário internacional, e é um tema ainda pouco estudado no Brasil. O objetivo principal deste trabalho é identificar as potencialidades e as limitações que a tipologia residencial pré-fabricada apresenta para a construção de casas de balanço energético nulo no contexto climático de Brasília, analisando seu potencial de produção de energia elétrica, estratégias passivas e eficiência energética, com especial foco nos materiais construtivos. A metodologia prevê a concepção de um projeto padrão com diretrizes bioclimáticas; a análise de diferentes combinações de materiais opacos para cobertura e paredes através de simulações computacionais termo energéticas com o programa Design Builder; análise dos resultados de acordo norma ASHRAE 55 (2013) de modo a identificar quais destas combinações oferecem maior conforto térmico aos usuários, e quais delas tem maior influência no balanço energético final. Dentre as 35 combinações de materiais de cobertura e paredes analisadas a que se mostrou mais eficiente foi a de cobertura em CLT - *Cross Laminated Timber* ($U=0,59\text{W/m}^2.\text{K}$; $CT=231\text{KJ/m}^2.\text{K}$), e paredes em Paineis de Tijolos Cerâmicos ($U=1,65\text{ W/m}^2.\text{K}$; $CT=140,95\text{KJ/m}^2.\text{K}$), de consumo anual de 67,56 kWh/m². Os resultados mostram que o consumo energético chega a dobrar em um mesmo projeto apenas pela diferente especificação de material de vedação de parede e cobertura. A produção de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos pode suprir o consumo da residência em 75% dos casos analisados. Com este estudo demonstra-se que é possível viabilizar habitações pré fabricadas de balanço energético nulo em Brasília, incentivando estudos futuros sobre a adequação das diretrizes de projeto para as demais Zonas Bioclimáticas do país.

Palavras-chave: Balanço energético nulo; Casa pré fabricada; Produção fotovoltaica residencial.

ABSTRACT

The Energy Efficiency theme comes from a context of crisis and rising taxes and is current due to the success of legal tools and technological advancement related to it. Buildings represent 47.6% of the country's electricity consumption, and this sector's economy potential is significant. Residential Net Zero Energy Buildings (NZEB) combined with pre-fabrication have received increasing attention on the international scene, and is a subject that has not been as much studied in Brazil yet. The main objective of this work is to identify the potentialities and the limitations that the pre-fabricated dwelling typology presents to NZEB, analyzing its electrical production potential, passive strategies and energy efficiency, with special focus on constructive materials. The methodology consists of the conception of a standard design with the application of bioclimatic guidelines; the analysis of different constructive materials for walls and roofs through computer simulations with Design Builder software; and comparison of results according to the ASHRAE 55 - 2013 standard, in order to identify which combination offer the higher thermal comfort standards to the users, and which have higher influence on the final energy consumption data. Among the 35 analyzed walls and roofs material combinations, the most efficient was the roof in CLT - Cross Laminated Timber ($U=0,59\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$; $CT=231\text{KJ}/\text{m}^2\cdot\text{K}$), and walls in Ceramic Bricks Panel ($U=1,65\text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$; $CT=140,95\text{KJ}/\text{m}^2\cdot\text{K}$), with annual consumption of $67,56\text{ kWh}/\text{m}^2$. The results show that the consumption can double only by changing the walls and roof materials. The electricity production through photovoltaic panels can supply the houses demand in 75% of the analyzed cases. This study shows that it is possible to enable pre-fabricated housing of zero energy balance in Brasilia, and may encourage further studies on the suitability of the design guidelines for the other bioclimatic zones of the country.

Keywords: Zero energy house; Pre-fabricated dwelling; Residential photovoltaic generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Relação geográfica da Região Sul/Sudeste com o DF e entorno.....	5
Figura 2: Propriedades privadas na Região Sul/Sudeste.....	5
Figura 3: Exemplo de Etiqueta Inmetro PBE Edifica.....	15
Figura 4: Consumo de energia elétrica no setor residencial no Brasil em 2011 e previsão para o ano de 2021.....	18
Figura 5: Demanda energética por setor no Distrito Federal nos últimos três anos.....	19
Figura 6: Consumo médio mensal (kWh) por pessoa nas Regiões Administrativas do DF nos últimos três anos.....	19
Figura 7: Zoneamento bioclimático brasileiro.....	21
Figura 8: Métodos alternativos de avaliação do desempenho térmico.....	24
Figura 9: Limites de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente ventilados.....	30
Figura 10: Temperaturas médias mensais para Brasília.....	34
Figura 11: Precipitação anual, temperaturas mínimas e máximas.....	34
Figura 12: Umidade relativa do ar na cidade de Brasília.....	35
Figura 13: Radiação diária máxima e mínima mensal com valores médios para Brasília.....	36
Figura 14: Carta solar para a cidade de Brasília.....	37
Figura 15: Rosa dos ventos para a cidade de Brasília, com indicação de frequência de ocorrência e de velocidades predominantes por direção.....	37
Figura 16 – Carta bioclimática de Fanger para Brasília, Zona bioclimática 4.....	38
Figura 17 – Radiação solar anual média no Brasil.....	40
Figura 18 – Estimativa da viabilidade econômica da fonte fotovoltaica no Brasil.....	40
Figura 19: exemplo de casa do catálogo da Sears.....	44
Figura 20: A Casa de Cobre em construção, e desenho isométrico.....	56
Figura 21: Possibilidades de customização da Casa de Cobre pela adição de módulos.....	57
Figura 22: A peça em formato de X que conferiu a originalidade do sistema.....	58

Figura 23: montagem do protótipo da Packaged House	58
Figura 24: A Casa 6x6m.....	61
Figura 25: O pilar em formato de compasso, estrutura principal da casa 8x8m.....	61
Figura 26: Painel de laminado de madeira cruzada ou CLT.....	65
Figura 27: Montagem de painéis CLT	65
Figura 28: Junções de painéis através do sistema "finger joints".....	65
Figura 29: Isotelha trapezoidal EPS	66
Figura 30: Isotelha trapezoidal PUR	66
Figura 31: Laje painel treliçada	67
Figura 32: Sistema laminar médio Ecotelhado.....	68
Figura 33: Painel de fachada LDR	68
Figura 34: Painel Isofachada PUR	69
Figura 35: Vedações em placas cimentícias e placas de gesso acartonado.....	70
Figura 36: Vedação em placas de EPS e argamassa armada.....	70
Figura 37: Painel de placas cimentícias e Thermopore	71
Figura 38: Painel de tijolos cerâmicos	72
Figura 39: Vista externa da Blu home modelo Origin.....	74
Figura 40: Esquema de possibilidades de composição de módulos Blu Home modelo Origin	74
Figura 41: Vista externa da Mima House	76
Figura 42: Divisórias internas móveis da Mima House	76
Figura 43: Vista externa da Archi+ na Civil Square, em Melbourne	78
Figura 44: Corte esquemático da Archi+.....	78
Figura 45: Possibilidades de tamanho da Archi+	80
Figura 46: Connect:5 – Vista externa e planta baixa, sem opcionais.	82
Figura 47: Connect:5 – Vista externa e planta baixa, com opcionais.	82
Figura 48: Modelo Confluence em duas versões customizadas.....	83
Figura 49: Variações do Modelo Confluence.	84

Figura 50: Variações do Modelo Térreo – 1 quarto e garagem.	86
Figura 51: Variações do modelo Térreo – 3 quartos.	86
Figura 52: Vista exterior da casa	91
Figura 53: Plantas baixas dos módulos A (54m ²), A+B (81m ²) e A+B+C (108m ²).....	92
Figura 54: Vista interna da casa na versão dois quartos	93
Figura 55: Vista da varanda.....	93
Figura 56: Planta de cobertura e de locação no terreno	95
Figura 57: Planta baixa da residência	96
Figura 58: Cortes A (transversal) e B (longitudinal) da residência	97
Figura 59: Elevações da residência	98
Figura 60: Orientação solar considerada para as simulações	100
Figura 61: Distribuição de aberturas nas fachadas por orientação	101
Figura 62: Padrão de ocupação da casa.....	109
Figura 63: Padrão de uso da iluminação artificial da casa.....	109
Figura 64: Cargas internas na casa	111
Figura 65: Distribuição do fluxo de vento no interior da edificação	113
Figura 66: Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente ventilados	114
Figura 67: Análise da temperatura operativa e limites de aceitabilidade.....	115
Figura 68: Limites de aceitabilidade inferior da ASHRAE 55 – 2013 e zona de ajuste do clo	117
Figura 69: Percurso solar para a cidade de Brasília	119
Figura 70: Graus hora excedentes no ambiente “Sala”	124
Figura 71: Graus hora excedentes no ambiente “Quarto 1”	125
Figura 72: Graus hora excedentes no ambiente “Quarto 2”	126
Figura 73: Graus hora excedentes no ambiente “Quarto 3”	127
Figura 74: Consumo de energia elétrica fixo na casa.....	130

Figura 75: Estimativa simplificada do consumo de energia elétrica do ar condicionado para cada combinação de cobertura e parede estudadas.....	132
Figura 76: Consumo energético total para cada combinação simulada.....	134
Figura 77: Percentuais de consumo de energia elétrica na combinação CLT+manta / Pannel Tijolo 140mm.....	136
Figura 78: Percentuais de consumo de energia elétrica na combinação Isotelha PUR / Isofachada PUR.....	136
Figura 79: Dados de saída do sistema de produção mensal.....	137
Figura 80: Comparativo dos totais anuais entre energia elétrica consumida em cada combinação de materiais e a energia produzida por placas fotovoltaicas.....	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo de consumo energético em Casas ZEB.....	13
Tabela 2: Posse média de equipamentos selecionados (2013-2050).....	18
Tabela 3: Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico	22
Tabela 4: Valores máximos admitidos para a transmitância térmica de paredes externas...	25
Tabela 5: Valores mínimos admitidos para a capacidade térmica de paredes externas.....	25
Tabela 6: Critérios e níveis de desempenho de coberturas quanto à transmitância térmica	26
Tabela 7: Critérios de avaliação de desempenho térmico para condições de verão	27
Tabela 8: Critérios de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno.....	27
Tabela 9: Percentual de aberturas envidraçadas nas fachadas.....	101
Tabela 10: Ângulos de sombreamento das aberturas envidraçadas	102
Tabela 11: Áreas de ventilação.....	102
Tabela 12: Características térmicas das coberturas	105
Tabela 13: Características térmicas das paredes.....	106
Tabela 14: Combinações de cobertura e parede avaliadas.....	107
Tabela 15: Cargas de equipamentos	111
Tabela 16: Consumo energético por metro quadrado	112
Tabela 17: Aumento nos limites de temperatura operativa aceitável em ambientes naturalmente condicionados.....	115
Tabela 18: Estimativa da potência dos aparelhos de ar-condicionado por ambiente.....	117
Tabela 19: Dados para a cidade de Brasília	119
Tabela 20: Fatores de perda adotados na simulação	120
Tabela 21: Estimativa do consumo de energia elétrica dos equipamentos	129
Tabela 22: Estimativa do Consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial	129
Tabela 23: Percentuais de consumo energético	135
Tabela 24: Dados de saída da simulação do sistema fotovoltaico	137

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	8
1.1.1 Objetivo Geral	8
1.1.2 Objetivos Específicos	8
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	8
2. REVISÃO DE LITERATURA: CONSUMO ENERGÉTICO E DESEMPENHO TÉRMICO	11
2.1 Balanço energético nulo	11
2.1.1 Residências ZEB – a influência do projeto no desempenho térmico da edificação e seu impacto no consumo energético residencial.....	12
2.2 Regulamentos de eficiência energética no Brasil e no mundo.....	13
2.2.1 Regulamento de eficiência energética em edificações residenciais.....	16
2.3 Consumo energético no setor residencial	17
2.3.1 Consumo Energético no Setor Residencial no Brasil	17
2.3.2 Consumo Energético no Setor Residencial no Distrito Federal.....	18
2.4 Normas brasileiras de desempenho térmico de edificações residenciais	20
2.4.1 Avaliação do desempenho térmico segundo a NBR 15220.....	20
2.4.2 Avaliação do desempenho térmico segundo a NBR 15575.....	23
2.4.2.1 Avaliação das Paredes Externas	24
2.4.2.2 Avaliação da Cobertura	25
2.4.2.3 Simulações Computacionais	26
2.5 A norma ASHRAE 55 – 2013 e as condições de conforto térmico para ambientes ventilados naturalmente.....	28
2.6 Ferramentas de simulação computacional térmica e energética de edificações	31
2.7 Estratégias de projeto para casas ZEB em Brasília.....	32
2.7.1 O Clima De Brasília.....	32

2.7.2	Redução do consumo através de Estratégias Passivas.....	38
2.7.3	Redução do consumo através da eficiência energética.....	39
2.7.4	Produção de Energia e Estratégias Proativas.....	39
2.9	Considerações finais sobre a revisão de literatura: estratégias de projeto para casas ZEB em Brasília.....	41
3.	REVISÃO DE LITERATURA: CASAS PRÉ FABRICADAS.....	43
3.1.	As casas pré fabricadas e as revoluções industriais.....	43
3.2	A casa mínima e a flexibilidade como necessidade.....	47
3.3	A customização como elemento de individualidade.....	50
3.4	Flexibilidade e adaptabilidade.....	53
3.5	Estudos de caso: as primeiras casas pré fabricadas.....	55
3.5.1	A Casa de Cobre, Walter Gropius, 1931.....	55
3.5.2	Packaged House, Walter Gropius e Konrad Wachsmann, 1931.....	57
3.5.3	Casa desmontável 6x6, Jean Prouvé, 1944.....	60
3.6	Estudos de caso: as casas pré fabricadas no Brasil.....	62
3.6.1	Breve histórico da pré fabricação residencial no Brasil.....	62
3.6.2	Materiais e sistemas construtivos utilizados na pré fabricação residencial no Brasil.....	64
3.6.2.1	Laminado de madeira cruzada ou Cross Laminated Timber (CLT).....	64
3.6.2.2	Isotelha trapezoidal EPS.....	66
3.6.2.3	Isotelha trapezoidal PUR.....	66
3.6.2.4	Laje Paineis Treliçada.....	67
3.6.2.5	Telhado Verde – Sistema laminar médio.....	67
3.6.2.6	Painel de fachada LDR.....	68
3.6.2.7	Painéis Isofachada PUR.....	69
3.6.2.8	Sistema Auto-portante de construção a seco.....	69
3.6.2.9	Sistema Monolite.....	70
3.6.2.10	Painel Thermopore.....	71

3.6.2.11 Painel misto de concreto armado e tijolos cerâmicos	72
3.7 Estudos de caso: as casas pré fabricadas da atualidade	72
3.7.1 Blu Homes, EUA - Bill Haney e Maura Mccarthy (2008)	73
3.7.2 Mima House, Portugal - Mário Sousa e Marta Brandão (2011)	75
3.7.3 Archi+	77
3.7.4 Connect Homes.....	81
3.7.5 Ideabox	83
3.7.6 P.A.T.H.	85
3.8 Considerações finais sobre a revisão de literatura: casas pré fabricadas.....	87
4. METODOLOGIA	89
4.1 Definição do projeto da casa pré-fabricada.....	90
4.2 Características consideradas para as simulações de casas ZEBs pré-fabricadas	99
4.2.1 Parâmetros fixos considerados nas simulações.....	99
4.2.2 Variáveis de projeto consideradas nas simulações: materiais e sistemas construtivos	102
4.3 Simulações do desempenho térmico e energético	103
4.3.1 Arquivo climático.....	103
4.3.2 Propriedades térmicas da envoltória	104
4.3.2.1 Características das Coberturas.....	104
4.3.2.2 Características das Paredes	106
4.3.2.3 Combinações de paredes e coberturas simuladas	107
4.3.3 Padrão de ocupação e iluminação.....	108
4.3.4 Cargas internas de equipamentos.....	110
4.3.5 Modelagem da ventilação natural	112
4.3.6 Condições de conforto e aceitabilidade dos usuários de acordo com a norma ASHRAE 55-2013.....	113
4.3.7 Dimensionamento do sistema de condicionamento artificial de ar	116

4.4 Simulações da estimativa de geração de energia.....	118
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	121
5.1 Simulações térmicas e análise de Conforto Térmico	121
5.1.1 Desconforto por calor	128
5.1.2 Desconforto por frio.....	128
5.2 Uso final de eletricidade da residência	128
5.2.1 Consumo energético fixo da residência	129
5.2.2 Consumo energético do sistema de climatização artificial	130
5.2.3 Consumo energético total.....	133
5.3 Dimensionamento do sistema fotovoltaico	137
5.4 Análise e interpretação dos resultados.....	138
5.5 Diretrizes de projeto para casas pré fabricadas de balanço energético nulo em Brasília	142
5.5.1. Implantação no terreno e orientação solar.....	143
5.5.2. Área interna e compactidade da casa.....	143
5.5.3. Sistema construtivo.....	143
5.5.5 Porosidade da edificação	144
5.5.6. Percentual de abertura envidraçada nas fachadas	144
5.5.7. Proteção solar das aberturas envidraçadas	144
5.5.8. Tipos de vidro.....	145
5.5.9. Sistema de aquecimento da água.....	145
5.5.10. Avaliação de conforto térmico adaptativo	145
5.5.11. Estimativa de consumo de energia.....	145
5.5.11.1 Uso de equipamentos.....	145
5.5.11.2. Sistema de iluminação artificial	146
5.5.11.3. Sistema de condicionamento de ar	146
5.5.12. Sistema de geração de energia renovável local	146
5.5.13. Análise de resultados de consumo e geração de energia elétrica.....	146

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	149
6.1 Limitações da pesquisa.....	152
6.2 Recomendações para trabalhos futuros.....	153
7. REFERÊNCIAS.....	155
APÊNDICE I – Cálculo de consumo de energia elétrica por ar condicionado para cada combinação de material de cobertura e parede por ambiente.....	163
APÊNDICE II – Resultados dos percentuais de horas de conforto.....	200
APÊNDICE III – Resultados dos percentuais de horas de desconforto por frio e por calor.....	204
APÊNDICE IV – Cálculo de consumo de energia elétrica por ar condicionado para cada combinação de material de cobertura e parede por ambiente.....	208

1. INTRODUÇÃO

O início da preocupação mundial com a questão da eficiência energética nos edifícios tem uma data precisa, conhecida como a do primeiro choque do petróleo - 17 de outubro de 1973. Tal fato deflagrou um processo na história dos edifícios no cenário internacional: regulamentos visando à redução do consumo energético em edifícios e políticas de incentivo com o mesmo fim. A eficiência energética nasceu, portanto, em um contexto de crise, e permanece atual em razão do sucesso das ferramentas legais utilizadas e do avanço tecnológico proporcionado pelo ambiente de crise e de elevações tarifárias.

Para Lamberts (2014), a eficiência energética nas edificações pode ser entendida como a obtenção de um serviço com baixo dispêndio de energia, através do uso racional e da diminuição no consumo dos usos finais de iluminação, equipamentos e aquecimento de água, aliados à incorporação de fontes renováveis de energia. As constantes pesquisas e legislações confirmam a necessidade imediata de redução do consumo de energia nas edificações, responsáveis por 40% dos gastos energéticos mundiais.

As edificações representam 47,6% da energia elétrica consumida no país. A energia consumida é representada não só pela operação e manutenção das edificações, como também pelos sistemas artificiais, que proporcionam conforto ambiental para seus usuários, como iluminação, climatização e aquecimento de água. O potencial de economia deste setor é expressivo, e segundo Lamberts (2014), o arquiteto pode racionalizar o uso da energia em um edifício, se reduzir o consumo em iluminação, condicionamento do ar e aquecimento de água e para conseguir isto, existem três ideias: usar sistemas naturais de iluminação e condicionamento, usar sistemas artificiais de maior eficiência e integrar estes dois sistemas (natural e artificial).

As restrições energéticas, tema constante na discussão mundial sobre sustentabilidade, têm enfatizado a importância de se adotar estratégias para redução do consumo energético dos edifícios e otimizar os gastos de recursos naturais, como a água, petróleo, entre outros. Segundo Diana Scillag, diretora do CBCS – Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, a etapa em que a edificação mais consome energia é durante sua ocupação, em sua manutenção, e em sua demolição. Isso explica o desinteresse de investidores em projetos de arquitetura que explorem soluções bioclimáticas, e que incorporem tecnologias que permitam um melhor desempenho energético e ambiental nos edifícios, uma vez que os benefícios vêm a longo

prazo, sem retorno direto aos investidores. De todo modo, atualmente, as medidas sustentáveis em empreendimentos passaram a ser questão de competitividade e não mais simples diferenciais. As construtoras serão obrigadas, em pouco tempo, a trabalhar dessa forma para não perder mercado (LEITE, 2012).

Segundo Didoné (2014), nos últimos anos, o tema edifícios energia zero (EEZ) tem recebido atenção crescente. Em 2010 a Comissão Europeia aprovou a reformulação da diretiva relativa ao desempenho energético dos edifícios (EPDB), que exige que até o final de 2020 todos os novos edifícios sejam edifícios quase energia zero, ou seja, que possuem consumo energético muito baixo. Porém, no Brasil, apesar de haver um recente regulamento para obrigatoriedade de etiquetagem energética de edifícios (BRASIL, 2014), o tema *Net Zero Energy Building* (NZEB) ainda não é suficientemente incentivado, e é ainda pouco estudado, principalmente no que diz respeito às edificações residenciais e à tipologia residencial unifamiliar – as casas.

Em relação à produção de energia elétrica através dos painéis fotovoltaicos, de acordo com Domingos (2014), a cidade de Brasília é a mais adequada para a implantação de edifícios NZEBs (Nearly Zero Energy Building), devido às características climáticas de interesse como temperatura, humidade relativa do ar, e a irradiância solar global. Essa constatação, somada à crescente popularização de tecnologias para a produção de energia solar e seu armazenamento culminam no desejo de desenvolver projetos para casas de balanço energético nulo, ou até mesmo positivo, nos casos em que a produção de energia vier a exceder o consumo. Independentemente da fonte, a eficiência energética dos edifícios está coberta; a redução da demanda energética é o elemento central de qualquer estratégia de balanço energético nulo. Os ZEBs são, acima de tudo, edifícios energeticamente eficientes (VOSS e MUSALL, 2013).

O tema “Energia Zero” tem recebido muita atenção nos últimos anos, pois aponta para o futuro uma real possibilidade de redução significativa dos índices de consumo energético mundial. Neste contexto, é preciso atualizar a legislação e incentivar a existência de edifícios ZEB no Brasil, país onde ainda existe um grande déficit habitacional. No que diz respeito à habitação, os últimos relatórios de Brasília e do Distrito Federal mostram que há um déficit habitacional estimado em 120 mil famílias, sendo previstos aproximadamente 20 mil casas (e 70 mil novos habitantes) a cada ano na cidade. Infelizmente, nem sempre as pessoas conseguem contratar arquitetos, na maioria das vezes por falta de conhecimento acerca da importância de um profissional qualificado no processo, e também por falta de recursos financeiros para a contratação dos serviços de projeto. Isto resulta em um enorme número de casas sem

nenhuma preocupação em relação aos custos de manutenção e consumo energético ao longo de sua vida útil.

Segundo Bernasconi (2008), construir uma grande quantidade de unidades habitacionais para suprir este enorme déficit exige um planejamento rigoroso e condizente com a atual situação do país como método essencial para a realização de obras bem pensadas e bem executadas.

A consciência de que não é mais possível conceber projetos como os implantados dos anos 60 a 80, em que eram construídas milhares de unidades habitacionais em terrenos distantes dos centros urbanos, sem qualquer rede de infraestrutura urbana, de saneamento e transporte, nem oportunidade de empregos, educação, saúde e lazer já existia na época em que a política habitacional foi implantada no DF. O problema é que a questão foi política, ou seja, tudo era feito às pressas de modo a conseguir votos em uma próxima eleição. Projetos habitacionais feitos desta maneira acabam por contribuir com a expansão horizontal das cidades, comprometendo as terras agricultáveis e de preservação ambiental no entorno das cidades.

Este tipo de expansão contribui também para o aumento do deslocamento pendular da população, por quilômetros de suas casas ao centro das cidades, aonde há emprego, saúde, educação, enfim, os elementos básicos para sua sobrevivência, e ao fim do dia refazem o longo percurso de volta para casa. Projetos com resultados como estes geraram estudos que ajudaram a formar os conceitos atuais, rejeitando este tipo de implantação e incentivando conjuntos habitacionais mais abrangentes e sustentáveis, incluindo o aspecto de inclusão e integração social, aonde a presença de equipamentos sociais e de lazer pode contribuir para a sociedade inclusive como fator para diminuir a violência urbana.

"A cidade é, na essência, um lugar de atividades mistas e diversificadas; contudo, no caso de indústrias como a de cimento e a de produtos químicos, usinas de aço e matadouros, o isolamento espacial é desejável, e justifica as jornadas relativamente longas para o trabalho. (...) O emprego do zoneamento para fins não-funcionais em áreas residenciais, muitas vezes produz a monotonia arquitetônica, a inconveniência prática e a segregação social. A mistura funcional é, vez por outra, tão imperiosa quanto a separação funcional." (MUMFORD, 2008)

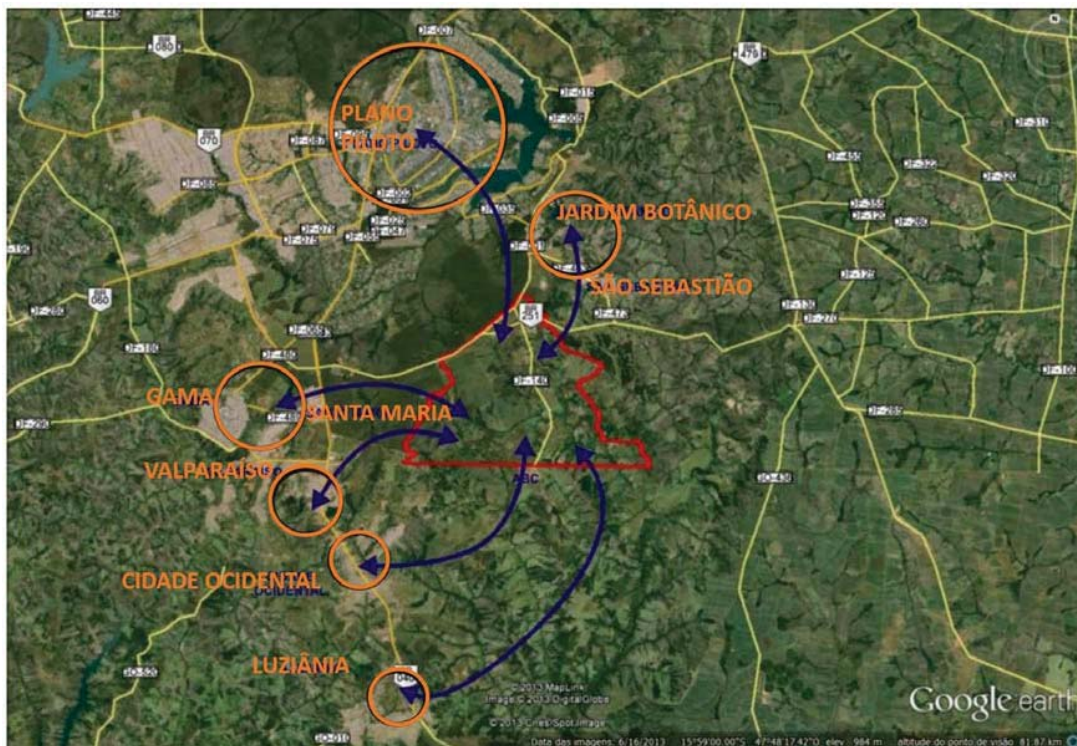
A implantação de novos conjuntos habitacionais deve considerar as redes de infraestrutura urbana, social e de transportes existentes, assim como a previsão de atividades de uso misto, para a geração de empregos e atividades locais. Deve-se pensar também na inserção destes novos conjuntos na malha urbana existente de modo que passem a se integrar à cidade, participando da paisagem e da vivência urbana como um todo.

Apesar disso, novos eixos de expansão estão sendo planejados para Brasília e o Distrito Federal. A área em torno da rodovia DF-140 se transformou no novo eixo de crescimento urbano da capital federal. O governo prevê que dentro de um prazo de 30 anos, a área de 13 mil hectares terá cerca de 500 mil moradores (MADER, 2010). Esta área de expansão prevê grandes condomínios residenciais para a classe média e média alta, além de edifícios para atividades comerciais e de serviços. A estratégia de expandir nesta área se justifica também pela beleza da região, com vales, montanhas e reservas naturais. A aposta das grandes construtoras e incorporadoras é nas famílias que preferem morar mais longe do centro urbano, mas com a qualidade de vida de morar mais próximo à natureza.

Para Rajão (2013), com base em projeções do IBGE, o governo estima que em três décadas o local agregará 951 mil pessoas. Chamada de Região Sul/Sudeste (SEDHAB, 2013), esta área de expansão se localiza ao sul de Brasília, a aproximadamente 20km da ponte JK. Na Figura 1, a região delimitada em vermelho delimita a área de expansão, e identifica ao norte a região de São Sebastião e Jardim Botânico, ao oeste a região de Santa Maria, e ao sudoeste, já no estado de Goiás, as cidades de Valparaíso, Cidade Ocidental e Luziânia.

A Região Sul/Sudeste prevê grandes condomínios residenciais para a classe média e média alta, e áreas centrais com edifícios para atividades comerciais e de serviços. Um dos motivos para expandir nesta direção é a beleza da região, com vales, montanhas e reservas naturais. Quase 80% dessa fatia do DF pertence a empresas privadas: há, ao todo, 350 proprietários de terras no local (RAJÃO, 2013). A aposta deste grupo de empresas investidoras é no discurso de que há vantagens em morar mais longe do centro urbano, desde que se tenha a qualidade de vida de estar próximo à natureza. O grande apelo destes novos condomínios fechados é justamente vender o discurso da natureza, da ecologia, da sustentabilidade. De certa forma isso faz com que as pessoas que compram seus lotes e pensam em construir suas casas nestes locais já tenham sido introduzidas a estes temas, e que procurem projetos de arquitetura voltados ao viés da construção sustentável. O resultado é o aumento de procura por residências ZEB, que apesar de apresentarem custos mais elevados de construção, podem ser absorvidos em áreas como estas.

Figura 1: Relação geográfica da Região Sul/Sudeste com o DF e entorno.



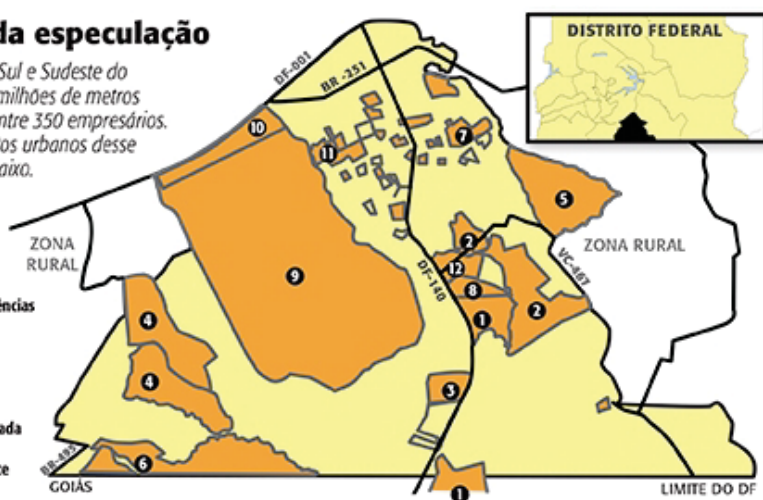
Fonte: SEDHAB, 2013.

Figura 2: Propriedades privadas na Região Sul/Sudeste.

A nova rota da especulação

Localizada nas regiões Sul e Sudeste do DF, esta área com 170 milhões de metros quadrados foi fadada entre 350 empresários. Os principais loteamentos urbanos desse grupo estão listados abaixo.

- 1 Alphaville
- 2 Citty
- 3 Dhama
- 4 Gaya Vivências e Convivências
- 5 Orimi
- 6 Residencial Pericumã
- 7 Saint Louis
- 8 Santa Luzia II
- 9 Santa Prisca
- 10 Área em litígio, reivindicada pela Santa Prisca
- 11 Tororó Eco Ville Residence
- 12 Via Engenharia



Fonte: Tahan e Lannes, 2013.

Ao menos 5 grandes condomínios já contam com infraestrutura pronta e praticamente todos os lotes vendidos. O mais antigo deles, condomínio Santa Mônica, de propriedade da construtora JC Gontijo, é composto por 725 lotes de em média 1000m², variando entre 700m² a 3500m². A rede Alphaville de São Paulo já tem duas fases com infraestrutura pronta, com lotes de 450 a 1000m². A incorporadora Dhama também tem dois condomínios entregues, sendo que cada um tem cerca de 490 lotes com áreas que variam entre 360 e 500m².

Com a crise econômica dos últimos anos, a região não se desenvolveu tanto quanto era esperado. Alguns condomínios de alto padrão foram construídos, e seus lotes foram vendidos rapidamente antes mesmo da conclusão de etapas de infraestrutura, mas encontram-se ainda em sua maior parte desocupados. Poucos foram os moradores que construíram suas casas e de fato se mudaram para o local. Outros condomínios e empreendimentos seguraram os lançamentos e início de obras, e aguardam o reaquecimento da economia para continuar.

Para a disseminação das residências ZEB, e até mesmo para que elas possam se tornar mais acessíveis economicamente, pode-se aliar a pré-fabricação, em que a indústria permite a produção em larga escala de uma solução ambientalmente correta e que gera energia elétrica para suprir a necessidade do consumidor ao longo dos anos. Um bom projeto residencial pode ser comercializado a pessoas diferentes. A pré-fabricação de estruturas industrializadas aliadas a soluções eficientes e ecologicamente corretas é vista com bons olhos pelo setor da construção, principalmente no cenário internacional. No Brasil, a indústria da pré-fabricação de estruturas industrializadas vem gerando maior interesse pelo setor da construção e, por este motivo, tem se tornado um mercado promissor para os profissionais da arquitetura e engenharia, que podem desenvolver atividades na área de elaboração de projetos, na produção, e na montagem destas estruturas.

“O arquiteto do futuro – se quiser voltar ao topo novamente – será forçado pelos eventos a se aproximar mais uma vez da produção da edificação. Se ele formar uma equipe de intensa cooperação com o engenheiro, o cientista e o construtor, então o projeto, a construção e a economia se tornarão novamente uma unidade – uma fusão de arte, ciência e negócios.” (GIEDION, 1992, p. 78)

O aumento tarifário da energia elétrica no Brasil no início do ano de 2015, e a crescente popularização de tecnologias para a produção e armazenamento de energia limpa, bem como a potencialidade climática da cidade de Brasília traz à tona o desejo de desenvolver projetos para casas de balanço energético nulo, que sejam autônomas em relação à geração de energia elétrica, e principalmente que tenham reduzidos níveis de consumo energético. A casa de

balanço energético nulo pode vir a produzir mais energia elétrica do que ela consome. Trata-se acima de tudo de um edifício com alta eficiência energética, sendo mais que apenas um edifício com tecnologias geradoras de energias acopladas.

De acordo com estas realidades, e com o fato deste tema ser ainda pouco estudado no Brasil, faz-se necessário traçar diretrizes de projeto que remetam aos atuais conceitos de sustentabilidade e eficiência energética das construções residenciais. O estudo evidenciará a crescente preocupação internacional em adotar meios para a redução do consumo energético, geração local de energias renováveis, bem como o surgimento de um novo mercado emergente, exigindo a atuação de profissionais relacionados à tecnologia da construção.

Por isso, a pré-fabricação de residências unifamiliares de classe média em servirá de base para esta dissertação, como sendo possibilitadora da reprodução em larga escala de soluções projetuais que resultem em residências de consumo zero, ou mesmo que produzam mais energia do que consomem. Além disso, disseminará as vantagens para que o consumidor final possa exigir níveis adequados de eficiência energética e de conforto ambiental dos imóveis em geral, de modo que as casas não precisem do ar-condicionado, um dos equipamentos que mais consome energia elétrica em residências. Aliadas a estas estratégias, a produção local de energia será calculada para verificar se residência atinge o balanço energético nulo. Ou seja, ao longo de um ano, sua produção de energia elétrica através de placas fotovoltaicas poderá ser equivalente à energia consumida da rede elétrica.

Neste contexto, justifica-se a necessidade de análises que tenham por objetivo traçar as diretrizes de projeto para casas pré-fabricadas de balanço energético nulo ou até mesmo positivo em Brasília, e implementar sistemas para a diminuição no consumo dos usos finais de iluminação e equipamentos para conforto ambiental térmico como formas efetivas de contribuição na melhoria da qualidade do ambiente e dos espaços construídos vivenciados diariamente: a residência.

Para as diretrizes das casas pré-fabricadas será levada em consideração a área de expansão sul/Sudeste, no que diz respeito às dimensões de lotes, e tamanho médio das casas. Para os usos finais, será feito um levantamento através de questionário em condomínios já consolidados de área próximas, como a do Jardim Botânico, que abrigam residências de tamanhos parecidos e famílias de classe econômica semelhante.

Esta dissertação traz diretrizes de projeto para casas pré-fabricadas de balanço energético nulo em Brasília. Reflexões sobre a adaptação das casas a outras localidades através de avaliação

e propostas de melhoria do desempenho termo energético e dos níveis de conforto ambiental poderão ser fruto de estudos futuros.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Identificar as potencialidades e as limitações que a tipologia residencial pré-fabricada apresenta para a construção de edificações de balanço energético nulo, analisando seu desempenho térmico, seu potencial de produção de energia elétrica, e eficiência energética.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Compreender o desempenho da residência unifamiliar pré-fabricada no clima da cidade de Brasília (Zona Bioclimática 4);
- Avaliar o impacto das especificações de materiais e sistemas construtivos no conforto térmico e na eficiência energética das casas pré-fabricadas, fundamentando-se em estudos que recomendam estratégias passivas para a cidade de Brasília;
- Propor diretrizes para projetar residências pré-fabricadas integrando conceitos de eficiência energética e geração de energia limpa e renovável in loco;
- Explorar o potencial da pré-fabricação no âmbito das residências ZEB.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho destaca estratégias de projeto e compara combinações de materiais opacos de paredes e coberturas para que habitações pré-fabricadas em Brasília tenham alta eficiência energética e consumo energético muito reduzido, e produzam sua própria energia elétrica, tendo em vista propostas para a melhoria do desempenho térmico e energético da casa, bem como dos níveis de conforto térmico de seus habitantes.

A estrutura da pesquisa está dividida em seis capítulos, nos quais são comentadas as etapas realizadas durante o desenvolvimento da pesquisa. No primeiro capítulo apresenta-se a

introdução sobre o tema da pesquisa, contextualizando as questões a serem exploradas e os objetivos almejados.

No segundo capítulo, apresenta-se a revisão de literatura relacionada com temas específicos da pesquisa, feita através de uma compilação dos principais assuntos que embasam conceitos, definições e auxiliam posteriormente na definição da metodologia e análises de estratégias para casas pré-fabricadas de balanço energético nulo em Brasília. Inicialmente são apresentados os atuais conceitos de balanço energético nulo, e a influência do projeto arquitetônico no consumo energético residencial. Na sequência, é feito um panorama acerca do consumo energético no setor residencial no Brasil e mais especificamente em Brasília. São abordadas também algumas estratégias passivas de projeto para ZEBs em Brasília, considerando a caracterização climática da cidade, possibilidades de redução do consumo através de estratégias passivas e ativas, e estratégias proativas, para geração de energia elétrica in loco.

No terceiro capítulo a revisão de literatura é direcionada ao estudo acerca das casas pré-fabricadas: quando e em que contexto surgiram no Brasil e no mundo, como se deu a evolução da tipologia, e exemplos de casas pré-fabricadas da atualidade, que já incorporam o conceito de ZEB. Por fim, o capítulo traz uma série de materiais pré-fabricados utilizados no Brasil, e mostra que nem sempre tem suas características térmicas levadas em consideração quando escolhidos em projeto. Tais materiais e suas características serão levados em conta na etapa seguinte do estudo, as simulações.

O quarto capítulo descreve a metodologia utilizada para as simulações de desempenho térmico, energético, e de geração de energia elétrica, iniciando-se pela definição do projeto desenvolvido para este trabalho. Todos os dados de entrada e características de projeto considerados são descritos, e são abordadas também as considerações relacionadas à revisão de literatura.

Em seguida, no capítulo quinto, é feita a apresentação e análise dos resultados obtidos nas simulações, comparando a análise de conforto térmico e a análise de consumo energético aos resultados de geração de energia renovável. A análise permite identificar quais combinações de materiais favorecem envoltórias mais eficientes para a casa pré-fabricada em questão. Este capítulo apresenta também uma síntese do trabalho, que resulta nas diretrizes de projeto para casas pré fabricadas de balanço energético nulo.

O trabalho se conclui no sexto capítulo, com a identificação das combinações de materiais que possibilitam casas pré-fabricadas de balanço energético nulo em Brasília, abordando também as limitações da pesquisa e as possibilidades de desenvolvimento do tema em trabalhos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA: CONSUMO ENERGÉTICO E DESEMPENHO TÉRMICO

2.1 Balanço energético nulo

Em função dos aumentos tarifários e das políticas reguladoras de consumo energético, atualmente temos exemplos de edifícios conhecidos como "*zero-energy building* (ZEB)". O termo ZEB – *Zero Energy Building*, refere-se a um edifício com demanda energética altamente reduzida através de sistemas eficientes que fazem com que o balanço anual de energia necessária para seu funcionamento possa ser suprido por tecnologias renováveis (TORCELLINI, 2006). Para alcançar tal resultado, são incorporados ao projeto dos edifícios conceitos de tecnologias passivas, ativas e proativas (ROMÉRO e REIS, 2012). Tais projetos são complexos, envolvendo metodologia específica, maior nível de detalhamento e planejamento, além de equipes multidisciplinares com profissionais de formações específicas e especialistas.

São vários os conceitos relacionados aos edifícios de balanço energético nulo. Além do simples "*ZEB (zero-energy building)*", temos os NZEB – *Nearly Zero Energy Buildings*, edifícios de alta performance energética em que a pequena quantidade de energia que necessitam é fornecida por fontes renováveis. Já a sigla nZEB diz respeito aos "*net-zero energy buildings*", que são edifícios em que necessariamente há uma troca entre a energia fornecida pela rede e a energia renovável produzida pelo edifício.

O primeiro passo em relação à possibilidade de ZEBs no Brasil foi dado em 2012, com a Resolução Normativa n° 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012), que estabelece as condições gerais para o sistema de compensação de energia elétrica. Esta resolução foi alterada pela de n° 687, em novembro de 2015 (ANEEL, 2015). Para este trabalho, o principal assunto tratado nestas resoluções é o sistema de compensação de energia elétrica, no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com micro geração ou mini geração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa. Para fins de compensação, a unidade consumidora passa a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de 60 (sessenta) meses.

Para a micro e mini geração de energia residencial, estas normativas fazem com que a energia gerada durante o dia que exceder o consumo da casa seja devolvida à rede, e que à noite, o consumo seja feito da rede elétrica normalmente. Ao fim de cada ciclo (mês), é deduzida da conta de energia elétrica a quantidade gerada devolvida à rede, de modo que o consumidor pague apenas o que ele excedeu em consumo (além das taxas fixas de distribuição). Isto permite que o sistema fotovoltaico, por exemplo, torne-se mais economicamente viável, uma vez que as baterias de armazenamento residencial são ainda muito caras. Além disso, devolver a energia à rede faz com que se aproveite toda a infraestrutura já existente nas cidades e grandes centros urbanos.

2.1.1 Residências ZEB – a influência do projeto no desempenho térmico da edificação e seu impacto no consumo energético residencial

Segundo Lamberts (2014), a análise do consumo de energia de uma edificação é tão importante para o processo de projeto quanto qualquer das outras ferramentas usadas comumente pelos projetistas, estando diretamente relacionada às decisões do projeto arquitetônico, sendo o desempenho da envoltória o mais afetado pelas decisões do arquiteto. O sistema de iluminação, no entanto, abrange pouco o fato de que a iluminação natural pode complementar ou até substituir a luz artificial durante determinados períodos do dia e do ano, especialmente no Brasil.

Mais da metade dos projetos ZEB construídos são residenciais. Isto ocorre por duas razões principais: uma delas é que a maior parte dos edifícios em geral são residenciais; e a outra, pelo fato de que é em casa que os conceitos de economia de energia são mais facilmente percebidos uma vez que as altas taxas de energia elétrica podem ser sentidas no bolso mais diretamente (VOSS E MUSALL, 2013). É em casa que se percebe efetivamente nas contas mensais se o esforço em reduzir o consumo de energia está funcionando ou não, e se estiver, os reflexos financeiros são facilmente notados. Além disso, a maioria dos edifícios ZEB localiza-se em climas onde o aquecimento tem um papel dominante no consumo (VOSS E MUSALL, 2013). Em países tropicais como o Brasil, a demanda é exatamente oposta: resfriamento. Entretanto, em Brasília o clima é agradável de acordo com os índices de conforto térmico. Infelizmente os edifícios não têm sido planejados para aproveitar este clima, e o ar-condicionado tem se tornado um item de status até mesmo em residências.

Para Voss e Musall (2013), a questão mais importante acerca das casas ZEB é a redução do consumo. A maioria das casas ZEB atualmente localizam-se em países de clima temperado

onde a maior parte da energia consumida diz respeito aos sistemas de aquecimento, mas o ponto mais importante que se destaca em cada estudo é a meta da redução de consumo de energia, não apenas a produção. Estratégias de projeto como ventilação natural, iluminação natural, sombreamento de aberturas no verão, e aproveitamento do calor do sol no inverno estão presentes em quase todos os casos. Os equipamentos de suprimento energético são em sua maior parte coletores solares térmicos para aquecimento da água, sistemas fotovoltaicos e aquecimento geotérmico.

No que diz respeito à influência do projeto no consumo de uma casa, de todos os usos finais residenciais podemos relacionar diretamente apenas dois: iluminação e condicionamento de ar. O aquecimento da água pode ser reduzido também, através de sistemas de aquecimento solar por exemplo, mas este sistema não está diretamente relacionado à arquitetura. A iluminação natural é de difícil consideração, pois mesmo que a luz do dia possa ser aproveitada, o sistema de iluminação artificial é bastante utilizado à noite, e seu consumo nunca chegaria a zero. Portanto, de modo geral, a influência do desempenho térmico do projeto de uma casa em seu consumo energético tem relação direta com os sistemas de condicionamento de ar.

A Agência de Energia Internacional (IEA) publicou em 2014 um relatório com 30 estudos de caso sobre edifícios de balanço energético nulo em todo o mundo. Dentre eles, 5 são residências unifamiliares em climas em que o aquecimento e o resfriamento são predominantes. A Tabela 1 compara os diferentes consumos de energia elétrica nestes estudos de caso, e dá parâmetros de valores de consumo energético em casas ZEB nestes países.

Tabela 1: Comparativo de consumo energético em Casas ZEB

Localidade	Nome do projeto	Arquiteto	Consumo (kWh/m².ano)
Dinamarca	Energy Flex House	Henning Larsens Architects	28
França	Le Charpak	Villa & Battesti	11
Itália	Leaf House	MEP	74
Itália	Casa Zero Energy	Arnaldo Savorelli	17
Espanha	LIMA	J. Sabate, C. Peters, H. Espe	57

Fonte: IEA, 2014 (adaptado pela autora).

2.2 Regulamentos de eficiência energética no Brasil e no mundo

A implementação de políticas públicas e programas governamentais de eficiência energética no Brasil torna-se imprescindível e urgente no sentido de orientar e capacitar mercados para incentivar o desenvolvimento de produtos mais eficientes e ambientalmente adequados

(ROMÉRO E REIS, 2012). Essas posturas estão relacionadas a uma busca contínua pela qualidade ambiental dos edifícios, que consideram as relações físicas, materiais e energéticas entre a construção e o ambiente que as circundam, o conforto ambiental interno, o consumo de recursos naturais e energéticos, a segurança, o impacto ambiental da construção e do uso do edifício, a reabilitação da edificação e outros (AMORIM apud PIARDI et al, 2000).

Uma importante iniciativa foi publicada no Brasil em 2009: o Regulamento Técnico de Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C. Ele especifica requisitos técnicos e métodos para a etiquetagem do nível de eficiência dos edifícios. A Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) varia de A (mais eficiente) a E (menos eficiente), e são avaliados três requisitos: envoltória, sistema de iluminação artificial e ar condicionado. A partir de agosto de 2014 os edifícios públicos federais novos ou aqueles que passarem por reforma que altere os sistemas de iluminação, condicionamento de ar ou a envoltória da edificação serão obrigados a obter a ENCE geral classe “A” (BRASIL, 2014).

O Ministério do Meio Ambiente, através do seu Departamento de Produção e Consumo Sustentáveis lançou recentemente uma cartilha orientativa¹ sobre reformas e construções particulares sustentáveis. É mais um passo rumo à disseminação da construção sustentável à população.

Enquanto isso, na Europa a reformulação das diretrizes do setor da construção civil publicada em 2010 exige que os seus Estados-Membros construam até o final de 2020 o padrão “Nearly Zero Energy Building” para todas as suas novas edificações. O programa de tecnologia de construção dos Estados Unidos também tem como objetivo introduzir edificações com balanço nulo de energia residenciais e não-residenciais até 2020 e 2025, respectivamente (VOSS, 2013).

¹ Disponível em: <http://www.mma.gov.br/publicacoes/responsabilidade-socioambiental/category/90-producao-e-consumo-sustentaveis> Acesso em 15 de Maio de 2016.

Figura 3: Exemplo de Etiqueta Inmetro PBE Edifica.



Fonte: INMETRO, 2016.

O Governo Australiano, em parceria com a indústria de projetos e construção civil do país lançou em 2001 uma publicação – que pode ser encontrada também em forma de portal eletrônico *online*², que aborda o tema da construção de casas e edifícios para um futuro sustentável. Em sua quinta edição, o manual oferece dicas e aborda com profundidade o tema de reformas e construções de modo a causar pouco ou nenhum impacto ao meio-ambiente, de modo econômico, e de modo a oferecer mudanças positivas na qualidade de vida da população. Em fevereiro de 2015 foi inaugurada em Melbourne a primeira casa com balanço energético positivo, na Austrália. Ou seja, uma casa que produz mais energia do que ela consome.

Em 30 de abril de 2015 foi lançada também a bateria residencial “Tesla Wall”, que possibilita o armazenamento da energia elétrica gerada por painéis fotovoltaicos em casas e edifícios residenciais em um painel compacto que fica próximo ao quadro geral de energia elétrica da casa. Através da instalação de placas de células fotovoltaicas nos edifícios, a energia é produzida durante o dia, mas no caso das edificações residenciais, o consumo maior se dá no período noturno – período no qual as tarifas são mais caras. Portanto, além do alto custo de instalação das placas solares, em edifícios residenciais a conta de energia diminui por conta da

² Disponível em: <http://www.yourhome.gov.au/> Acesso em 10 de Maio de 2016.

devolução de carga elétrica para a rede, mas não chega a se anular. Esta bateria vem solucionar o problema do armazenamento de energia gerada em residências, uma vez que a energia gerada durante o dia pode ser utilizada à noite, sem ter que devolver energia à rede durante o dia e pagar um valor mais elevado por ela novamente quando realmente tem-se a necessidade do uso.

2.2.1 Regulamento de eficiência energética em edificações residenciais

A primeira versão do Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) foi publicada em 2010 no Brasil. O RTQ-R (BRASIL, 2012) avalia a eficiência energética de edificações residenciais, e abrange metodologia para avaliação de três diferentes tipologias residenciais: unidades habitacionais autônomas (unifamiliares ou multifamiliares), edificações multifamiliares e áreas de uso comum de condomínios residenciais.

Para a unidade habitacional autônoma são avaliados o desempenho da envoltória dos ambientes de permanência prolongada e o sistema de aquecimento de água. Já para as edificações multifamiliares é avaliado o desempenho da envoltória e áreas de uso comum, o desempenho do sistema de aquecimento de água, dos sistemas de iluminação e ventilação natural e artificial dos equipamentos. Os níveis de eficiência variam de "A" (mais eficiente) a "E" (menos eficiente). A classificação geral da edificação é calculada por meio das eficiências individuais de cada requisito, ponderado conforme o zoneamento bioclimático brasileiro. O método de classificação é baseado no índice de graus-hora de resfriamento (GHR), para o desempenho de verão e consumo relativo de aquecimento (Ca), para o desempenho no inverno. O desempenho da envoltória condicionada artificialmente também é avaliado (Cr), mas esta avaliação é informativa, e não faz parte da classificação da eficiência da edificação.

O desempenho da envoltória pode ser avaliado por dois métodos: o prescritivo, no qual os indicadores do desempenho da envoltória são calculados através de equações de acordo com a zona bioclimática; e o método de simulação, onde os indicadores são obtidos através da simulação térmica e energética. Pelo método prescritivo, as equações aferem o desempenho da envoltória da edificação. As equações estimam o indicador de consumo relativo para aquecimento e o indicador de consumo relativo para refrigeração dos ambientes de permanência prolongada. Já no método de simulação, o desempenho é simulado para a condição de ventilação natural. Os resultados fornecem a classificação da envoltória para a condição de verão.

Para a classificação da envoltória da edificação, na ponderação dos níveis de eficiência para verão e inverno, os pesos variam de acordo com a zona bioclimática, da zona 1 a 4. Para as zonas 5 a 8, a eficiência da envoltória é determinada apenas pelos resultados de verão.

No desenvolvimento do RTQ-R foi considerado um padrão típico de ocupação e comportamento dos usuários, que muitas vezes não corresponde à realidade das residências avaliadas, e podem comprometer a avaliação do desempenho.

Para Sorgato (2015), o método do RTQ-R não garante uma avaliação adequada de que os ambientes proporcionem condições confortáveis termicamente. As edificações que possuem um envelope com baixo desempenho apresentam mais horas de desconforto nos ambientes. Seria importante que o método do RTQ-R avaliasse o desempenho da envoltória considerando o desempenho térmico e o consumo de energia para condicionamento artificial nas horas em que os ambientes não atendem às condições de conforto térmico (SORGATO, 2015).

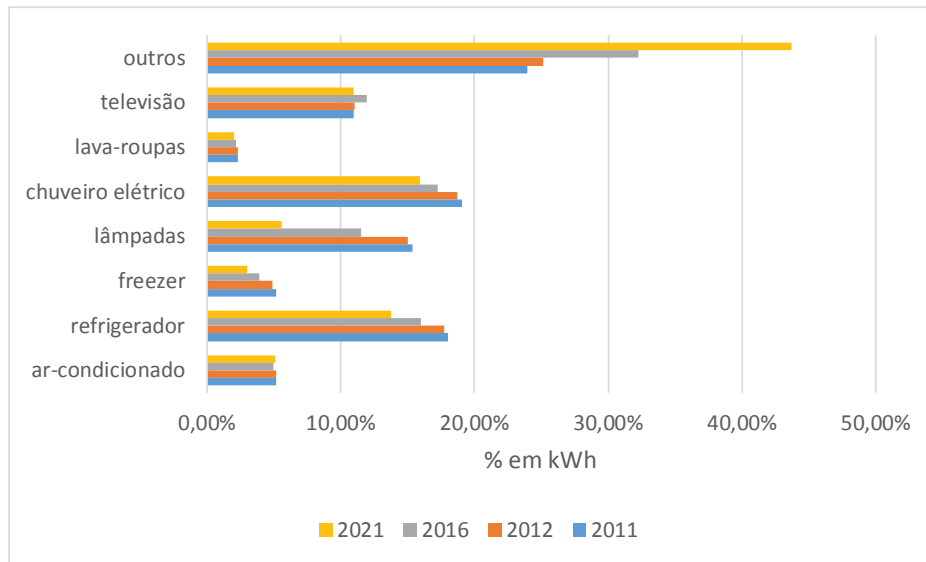
2.3 Consumo energético no setor residencial

2.3.1 Consumo Energético no Setor Residencial no Brasil

O gráfico da Figura 4 mostra como o consumo de energia elétrica está dividido no setor residencial e sua provável evolução em dez anos, devido ao crescimento demográfico e econômico. É visível que, ao mesmo tempo que os índices de consumo de vários equipamentos como lâmpadas e refrigeradores caem, outros como ar-condicionado se mantêm ou até mesmo aumentam.

Estudos feitos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2012) mostram a evolução da eficiência energética nos próximos dez anos, bem como a demanda elétrica nos diferentes setores. No setor residencial é esperado que as lâmpadas representem a maior evolução em termos de eficiência, devido à difusão da tecnologia LED e à política de proibição de comercialização de lâmpadas alógenas (EPE, 2012). Os dados da Tabela 2 dão uma previsão da demanda energética no Brasil no ano de 2050, mostrando que o ar-condicionado é responsável pelas maiores taxas de crescimento.

Figura 4: Consumo de energia elétrica no setor residencial no Brasil em 2011 e previsão para o ano de 2021.



Fonte: EPE (2012), adaptado pela autora.

Tabela 2: Posse média de equipamentos selecionados (2013-2050).

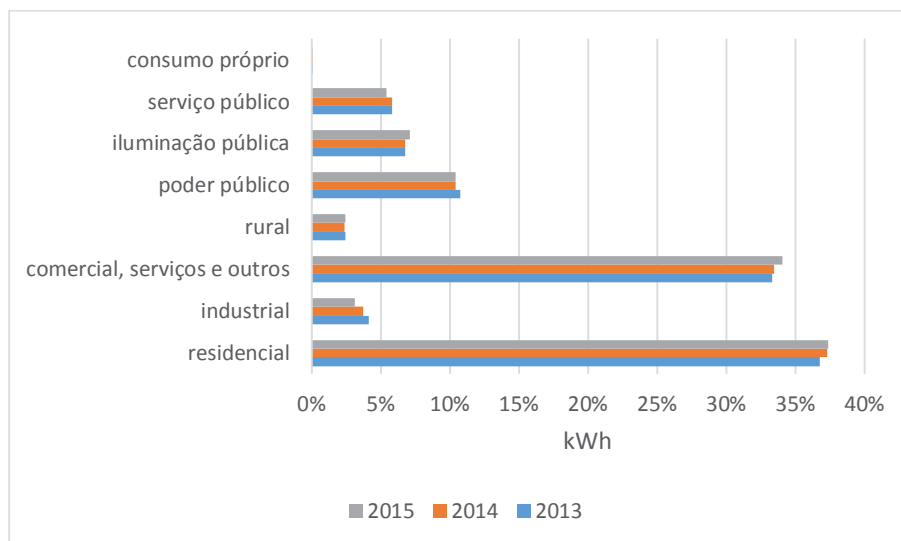
Equipamento	2013	2050
Ar condicionado	0,23	0,65
Geladeira	1,03	1,03
Lâmpada	8,25	12,13
Chuveiro	0,70	0,32
Televisão	1,61	2,32
Máquina de lavar	0,68	0,94
Freezer	0,18	0,12

Fonte: EPE (2014).

2.3.2 Consumo Energético no Setor Residencial no Distrito Federal

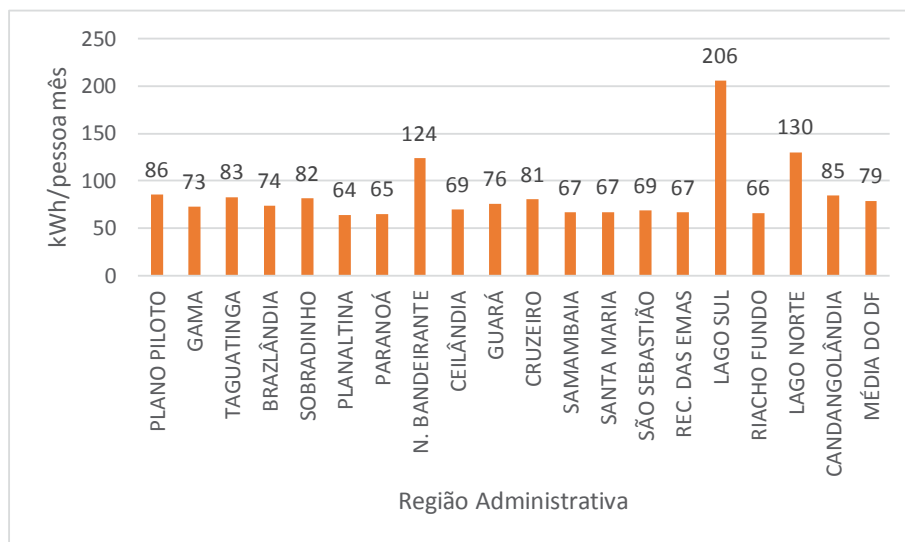
O consumo energético residencial no Distrito Federal (DF) representou 37% do consumo total da cidade nos últimos 3 anos, de 2013 a 2015 (CEB, 2016), e pode ser visto na Figura 5. Uma redução no consumo em todos os setores pode ser notada. Devido à crise hídrica no Brasil nos últimos anos, o aumento das tarifas de energia elétrica foi de aproximadamente 25% em 2015. Como reflexo deste aumento nas taxas, a redução do consumo de energia elétrica se deu em praticamente todos os setores.

Figura 5: Demanda energética por setor no Distrito Federal nos últimos três anos



Fonte: CEB (2016), adaptado pela autora.

Figura 6: Consumo médio mensal (kWh) por pessoa nas Regiões Administrativas do DF nos últimos três anos.



Fonte: CEB (2016), adaptado pela autora.

O consumo médio mensal no DF (Figura 6) no setor residencial é de 79kWh por pessoa. Percebe-se que o consumo médio mensal está também relacionado às diferentes faixas de renda e classe econômica que prevalece nas regiões avaliadas, onde por exemplo na Região Administrativa do bairro Lago Sul o consumo é cerca de três vezes maior do que nas Regiões de Planaltina, São Sebastião e Recanto das Emas.

2.4 Normas brasileiras de desempenho térmico de edificações residenciais

Atualmente no Brasil estão em vigor duas normas de desempenho térmico para edificações residenciais, a NBR 15220 (ABNT, 2005), e a NBR 15575 (ABNT, 2013).

As diretrizes construtivas da NBR 15220 são aplicadas para habitações unifamiliares de interesse social, e a NBR 15575 é aplicada para todo tipo de edificação residencial. Para Sorgato (2015), as normas apresentam diferenças no percentual de abertura para ventilação dos ambientes de permanência prolongada, e também, pequenas diferenças nos limites das propriedades térmicas dos componentes construtivos de paredes e coberturas.

2.4.1 Avaliação do desempenho térmico segundo a NBR 15220

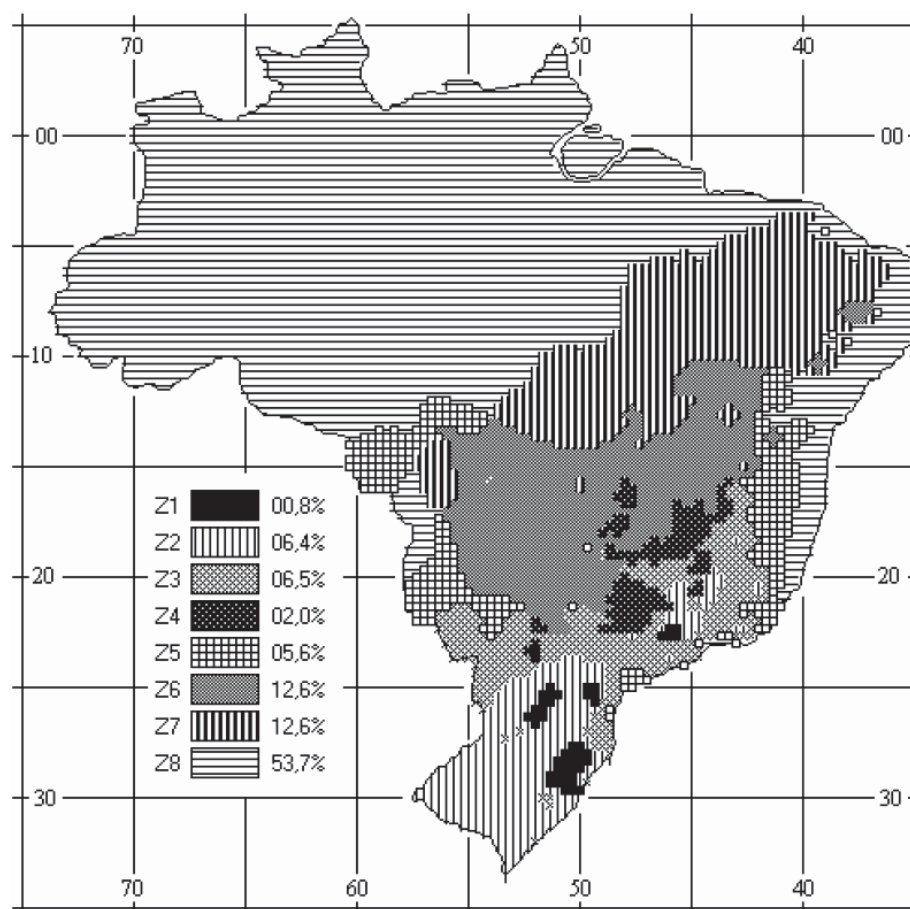
O contexto da NBR 15220 (ABNT, 2005) é voltado para o desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares de interesse social. A norma é composta por 5 partes. A primeira estabelece as definições, unidades e simbologia a serem utilizadas nas partes seguintes, e a segunda parte descreve os métodos de cálculo de transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico e fator solar de elementos e componentes das edificações.

A terceira parte da norma estabelece o zoneamento bioclimático brasileiro, que consiste na divisão do território brasileiro em 8 zonas relativamente homogêneas quanto ao clima (ALVIM, 2015). O zoneamento bioclimático agrupa as diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, através de estratégias bioclimáticas baseadas na carta bioclimática de Givoni (1992). Tais recomendações estão baseadas em propriedades térmicas dos componentes construtivos, tamanhos de aberturas, elementos de sombreamento e estratégias de condicionamento térmico passivo, tais como ventilação cruzada, resfriamento evaporativo, inércia térmica, aquecimento solar passivo, umidificação, dentre outras. Os valores de resistência térmica, capacidade térmica, atraso térmico e fator solar permitem fazer a caracterização térmica das paredes e coberturas.

A quarta e a quinta parte explicam o procedimento para determinação da resistência e da condutividade térmica de materiais através de dois métodos distintos.

Para a elaboração do zoneamento bioclimático, o território brasileiro foi dividido em 6.500 células, cada uma caracterizada por sua posição geográfica e pelas médias mensais de temperaturas máximas e mínimas, e dos valores de umidade relativa do ar. No entanto, apenas 330 células apresentam dados climáticos medidos, as demais células tiveram seu clima estipulado por meio de interpolação. Após a divisão do território em células, cada uma delas foi classificada a partir da aplicação de uma carta bioclimática adaptada daquela sugerida por Givoni (1992). Por fim, agrupou-se os conjuntos das células classificadas em um mesmo tipo, dando origem às zonas bioclimáticas (RORIZ et al, 1999). A Figura 7 apresenta o mapa do Brasil com as divisões das zonas bioclimáticas. O percentual do território correspondente a cada zona está indicado na legenda do mapa.

Figura 7: Zoneamento bioclimático brasileiro



Fonte: ABNT, 2005.

Para cada zona bioclimática foram associadas estratégias de condicionamento térmico passivo apontadas por Givoni com limites aceitáveis de indicadores do desempenho térmico adaptados do Método de Mahoney (RORIZ et al, 1999). As estratégias de condicionamento térmico utilizadas pela norma são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico

Estratégia	Detalhamento
A	O uso de aquecimento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por frio.
B	A forma, a orientação e a implantação da edificação, além da correta orientação de superfícies envidraçadas, podem contribuir para otimizar o seu aquecimento no período frio através da incidência de radiação solar. A cor externa dos componentes também desempenha papel importante no aquecimento dos ambientes através do aproveitamento da radiação solar.
C	A adoção de paredes internas pesadas pode contribuir para manter o interior da edificação aquecido.
D	Caracteriza a zona de conforto térmico (a baixas umidades).
E	Caracteriza a zona de conforto térmico.
F	As sensações térmicas são melhoradas através da desumidificação dos ambientes. Esta estratégia pode ser obtida através da renovação do ar interno por ar externo através da ventilação dos ambientes.
G e H	Em regiões quentes e secas, a sensação térmica no período de verão pode ser amenizada através da evaporação da água. O resfriamento evaporativo pode ser obtido através do uso de vegetação, fontes de água ou outros recursos que permitam a evaporação da água diretamente no ambiente que se deseja resfriar.
H e I	Temperaturas internas mais agradáveis também podem ser obtidas através do uso de paredes (externas e internas) e coberturas com maior massa térmica, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite quando as temperaturas externas diminuem.
I e J	A ventilação cruzada é obtida através da circulação de ar pelos ambientes da edificação. Isto significa que se o ambiente tem janelas em apenas uma fachada, a porta deveria ser mantida aberta para permitir a ventilação cruzada. Também deve-se atentar para os ventos predominantes da região e para o entorno, pois este pode alterar significativamente a direção dos ventos.
K	O uso de resfriamento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por calor.
L	Nas situações em que a umidade relativa do ar for muito baixa e a temperatura do ar estiver entre 21 e 30oC, a umidificação do ar proporcionará sensações térmicas mais agradáveis. Essa estratégia pode ser obtida através da utilização de recipientes com água e do controle da ventilação pois esta é indesejável por eliminar o vapor proveniente de plantas e atividades domésticas.

Fonte: ABNT, 2005.

Apesar da norma NBR 15220 (ABNT, 2005) e o zoneamento bioclimático brasileiro terem sido feitos para o contexto de habitações unifamiliares de interesse social, a falta de outras normativas brasileiras faz com que estes parâmetros sejam utilizados como referência para

outros tipos de edificações, com diferentes usos e de tipologias diversas. No entanto, para Roriz (2012), o a aplicação do zoneamento bioclimático para qualquer tipo de edificação habitacional, como é feito pela NBR 15575 (ABNT, 2013), não é adequada.

2.4.2 Avaliação do desempenho térmico segundo a NBR 15575

A NBR 15575 foi aprovada mais recentemente, e entrou em vigor no ano de 2012. Uma revisão foi solicitada pelo setor da construção civil, e em fevereiro de 2013 foi publicada sua versão final, que entrou em vigor em julho de 2013. Esta norma preconiza o desempenho de edificações habitacionais, e é dividida em seis partes. A primeira parte compreende requisito gerais, a segunda fala sobre requisitos para os sistemas estruturais, a terceira sobre requisitos para os sistemas de pisos, a quarta parte é dedicada aos requisitos para vedações internas e externas, a quinta parte diz respeito aos requisitos para sistemas de coberturas e a sexta e última parte aborda os requisitos para os sistemas hidrossanitários. Nas partes quatro e cinco, onde são abordados os sistemas de vedações verticais e os de cobertura, são determinados também os limites de propriedades térmicas destes elementos.

A avaliação do desempenho térmico em residências pode ser feita com base na Norma NBR 15575 – Desempenho de Edificações Habitacionais (ABNT, 2013), que em seu capítulo 11 trata especificamente do Desempenho Térmico. É importante esclarecer que a norma não trata de condicionamento artificial, seja ele refrigeração ou calefação, portanto todos os critérios estabelecidos são baseados em condições naturais de insolação, ventilação, dentre outras.

A avaliação do desempenho térmico pode ser feita pelo procedimento simplificado da norma³, que é uma verificação de atendimento aos requisitos e critérios para o envelopamento (paredes externas) da edificação, baseado em valores de transmitância térmica (U)⁴, e capacidade térmica (CT)⁵ das paredes de fachadas externas e das coberturas. O método simplificado e a norma tem como referência o Zoneamento Bioclimático Brasileiro da NBR 15220 – Desempenho Térmico de Edificações, parte 3 (ABNT, 2005). Caso a edificação não atenda aos critérios, é necessária a realização de medições em campo, ou simulações computacionais no caso de edifícios ainda não construídos. A avaliação simplificada, ilustrada na Figura 8, prevê para as

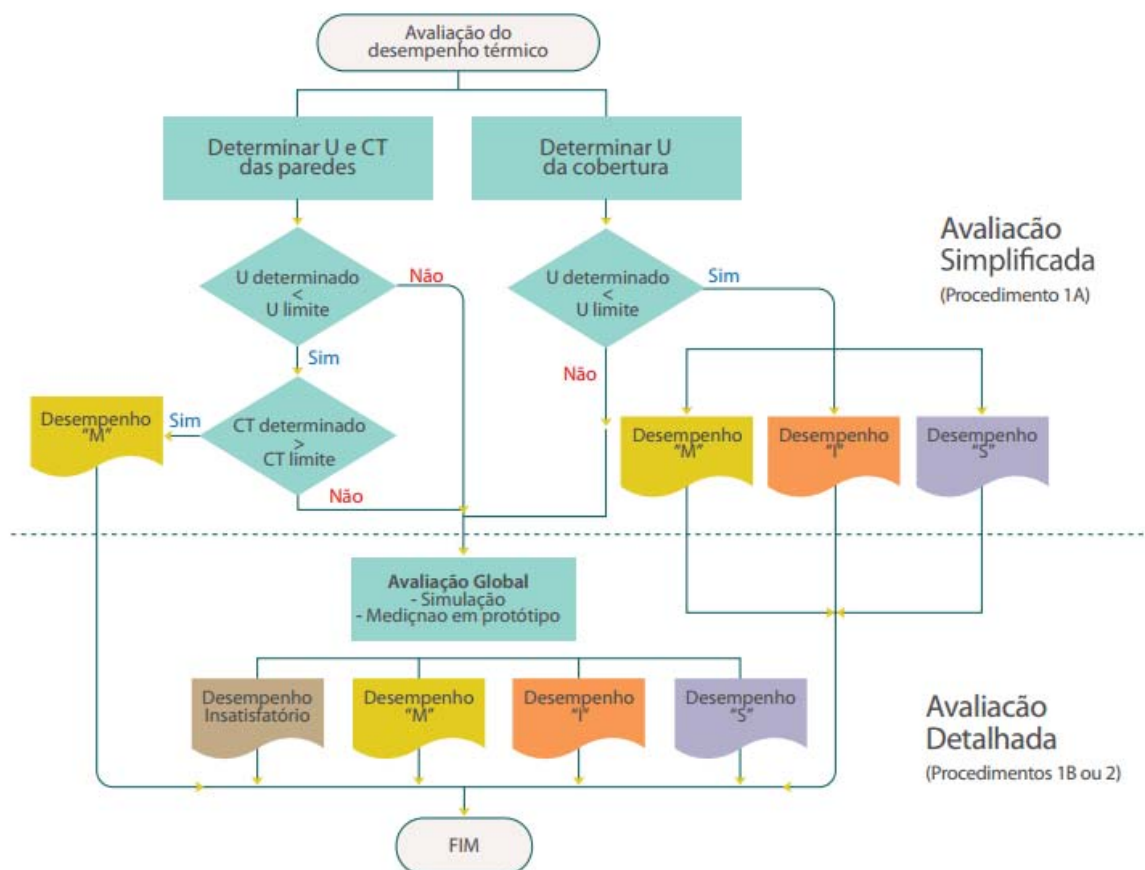
3 Procedimento 1A – Simplificado (normativo).

4 Transmitância térmica: fluxo de calor que atravessa a área unitária de um componente ou elemento quando existe um gradiente térmico de 1°K entre suas faces opostas, sendo o fluxo expresso em Watts/m².°K. inverso da resistência térmica. Fonte: ABNT, 2005.

5 Capacidade térmica: quantidade de calor por área unitária necessária para variar em uma unidade a temperatura de um componente ou elemento. Expressa em kJ/m².°K. Fonte: ABNT, 2005.

paredes externas (envoltória) apenas o nível mínimo (M) de atendimento, que é pré-requisito obrigatório. Caso o pré-requisito não seja atingido, ou caso se queira demonstrar que é possível alcançar os níveis Intermediário (I) e Superior (S), a avaliação deve ser feita através da avaliação detalhada, que inclui a metodologia de simulação computacional.

Figura 8: Métodos alternativos de avaliação do desempenho térmico



Fonte: Martins, 2013.

2.4.2.1 Avaliação das Paredes Externas

Com base na NBR 15220 – parte 3 (ABNT, 2003), os dados de transmitância e capacidade térmica da composição de elementos construtivos da parede devem ser identificados. É levado em conta também o valor de transmitância α^6 , que se refere à cor da camada mais externa da

⁶ Valor de α extraído da tabela B.2 – Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas) e emissividade (ϵ) para radiações a temperaturas comuns (ondas longas), página 8, Anexo B da NBR 15220 – Parte 2. Fonte: ABNT, 2005.

parede. Com estes dados em mãos, é possível passar para a avaliação normativa, verificando o cumprimento dos pré-requisitos para a Zona Bioclimática 4 (Brasília). A Tabela 4 e a Tabela 5 mostram os intervalos admitidos para cada uma das Zonas Bioclimáticas, para os valores de transmitância e capacidade térmica, respectivamente.

Tabela 4: Valores máximos admitidos para a transmitância térmica de paredes externas

Transmitância térmica - U (W/m².K)		
Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
	$\alpha^* \leq 0,6$	$\alpha^* > 0,6$
U ≤ 2,5	U ≤ 3,7	U ≤ 2,5
*α é a absorvância à radiação solar da superfície da parede.		

Fonte: Tabela 23, página 27 da NBR 15575 – Parte 4, ABNT, 2013.

Tabela 5: Valores mínimos admitidos para a capacidade térmica de paredes externas

Capacidade térmica - CT (kJ/m².K)	
Zona 8	Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6, e 7
Sem requisito	≥ 130

Fonte: Tabela 14, página 27 da NBR 15575 – Parte 4, ABNT, 2013.

Com estes dados, verifica-se se o tipo de parede especificado é adequado ou não para a região em que se encontra.

2.4.2.2 Avaliação da Cobertura

Para a cobertura também são necessários os dados de transmitância térmica e absorvância. Com estes dados em mãos, é possível passar para a avaliação normativa, verificando o cumprimento dos pré-requisitos para a Zona Bioclimática 4 (Brasília). A Tabela 6 mostra os intervalos admitidos para cada uma das Zonas Bioclimáticas, para os valores de transmitância da cobertura, determinando seu nível de desempenho.

Com isso, verifica-se se o tipo de cobertura especificado é então adequado para a região em que se encontra.

Tabela 6: Critérios e níveis de desempenho de coberturas quanto à transmitância térmica

Transmitância térmica - U (W/m ² .K)					Nível de desempenho
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 6		Zonas 7 e 8 ⁷		
U ≤ 2,3	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$	M
	U ≤ 2,3	U ≤ 1,5	U ≤ 2,3 FV	U ≤ 1,5 FV	
U ≤ 1,5	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$	I
	U ≤ 1,5	U ≤ 1,0	U ≤ 1,5 FV	U ≤ 1,0 FV	
U ≤ 1,0	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$	S
	U ≤ 1,0	U ≤ 0,5	U ≤ 1,0 FV	U ≤ 0,5 FV	

Fonte: Tabela I.4, página 55 da NBR 15575 – Parte 5 ABNT, 2013, adaptada pela autora.

2.4.2.3 Simulações Computacionais

A análise de desempenho pode ser também realizada pelo método da simulação computacional. Este método pode ser adotado quando o material não passar pelos pré-requisitos da avaliação simplificada, ou caso se queira demonstrar que os níveis de desempenho são intermediários ou superiores.

Para as simulações computacionais deve ser utilizado o software Energy Plus ou outros programas que sejam validados pela norma ASHRAE 140. O arquivo climático deve apresentar dados do ano de referência (arquivo TRY – *test reference year*), e devem ser simuladas as 8760 horas do ano.

A geometria do modelo da habitação a ser simulada deve considerar cada ambiente como uma zona térmica. Devem ser inseridos todos os dados térmicos dos materiais que constituem as paredes e a cobertura da edificação, bem como as aberturas e os dispositivos de sombreamento. A orientação solar deve ser a mesma determinada em projeto. Para a avaliação do dia típico de verão, são avaliados os resultados no ambiente de permanência prolongada (salas ou quartos) com a maior área de aberturas envidraçadas esteja voltada para oeste, e a parede externa adjacente esteja voltada para o norte. Caso não seja possível, o ambiente pode ter apenas uma janela voltada para oeste. Para a avaliação do dia típico de inverno é avaliado o ambiente que tem janela voltada para o sul e a outra parede exposta voltada para leste; caso não seja possível, o ambiente deve ter ao menos uma janela voltada para o sul. Deve-se considerar que os ambientes internos tenham apenas 1 renovação de ar por hora, e que não

⁷ Na Zona Bioclimática 8 considera-se atendido o critério para coberturas em telhas cerâmicas, mesmo sem a presença de forro. Nota: o fator d ventilação (FV) é estabelecido na ABNT NBR 15220-3, em função das dimensões das aberturas de ventilação nos beirais. Fonte: ABNT, 2005.

haja elementos de sombreamento nas janelas. Não devem ser consideradas a presença de usuários e equipamentos nos ambientes.

Para a avaliação, são comparadas as temperaturas do ar interna e a temperatura externa de bulbo seco nos dias típicos de verão e inverno. A partir da diferença ente temperatura interna e externa, em graus, classifica-se o desempenho térmico. A Tabela 7 mostra as diferenças necessárias para classificação de cada nível.

Tabela 7: Critérios de avaliação de desempenho térmico para condições de verão

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
M	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$
I	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ}\text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 1^{\circ}\text{C})$
S	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4^{\circ}\text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ}\text{C})$ e $T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 1^{\circ}\text{C})$

Ti,max é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius;
 Te,max é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius;
 Ti,min é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius;
 Te,min é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius;
 NOTA: Zonas Bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3

Fonte: ABNT, 2013

Tabela 8: Critérios de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 5	Zonas Bioclimáticas 6, 7 e 8
M	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3^{\circ}\text{C})$	
I	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 5^{\circ}\text{C})$	Nestas Zonas este critério não precisa ser verificado.
S	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 7^{\circ}\text{C})$	

Ti,min é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius;
 Te,min é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius;
 NOTA: Zonas Bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3

Fonte: ABNT, 2013

O método de simulação computacional da NBR 15575 foi analisado por Sorgato et al. (2013), que concluíram que o método avalia inadequadamente o desempenho térmico das edificações residenciais por desconsiderar as cargas internas (ocupação, iluminação e equipamentos) e o comportamento do usuário, simulando a edificação fora da realidade de uso e em condições extremas.

2.5 A norma ASHRAE 55 – 2013 e as condições de conforto térmico para ambientes ventilados naturalmente

O Brasil não possui norma de conforto térmico para edificações naturalmente ventiladas. Um grupo de pesquisadores está elaborando uma proposta para a primeira norma brasileira de conforto térmico humano em edificações com ventilação natural (LAMBERTS et al, 2013). De acordo com Sorgato (2015), a proposta da norma está sendo desenvolvida com base na norma internacional ASHRAE Standard 55-2013. Por este motivo, as condições de conforto térmico consideradas nesta norma serão apresentadas a seguir.

Segundo Olesen (2007, apud Sorgato, 2015), os critérios para avaliação do conforto térmico em edificações condicionadas naturalmente devem ser diferentes dos critérios adotados para edificações com condicionamento artificial devido às diferentes expectativas e adaptações dos usuários. Para as edificações condicionadas naturalmente, alguns modelos adaptativos fazem uma relação entre a temperatura no interior da edificação e a temperatura do ar, levando em consideração que os usuários se adaptam às variações sazonais e ao clima local. Segundo De Dear e Brasger (2002) apud Sorgato (2015), as teorias dos modelos adaptativos estabelecem, além dos fatores físicos e fisiológicos, a importância da expectativa e as preferências térmicas dos ocupantes do ambiente. Ou seja, a satisfação do usuário é influenciada pela expectativa do clima ambiente, relacionada às condições existentes.

A ASHRAE standard 55 foi publicada pela primeira vez em 1966, e republicada nos anos de 1974, 1981 e 1992. A partir de 2004, a norma vem sendo atualizada continuamente, tendo seus anexos publicados periodicamente e postados gratuitamente em sua página da internet. Os 18 anexos publicados desde 2010 foram incorporados à última versão da norma, gerando a mais atual publicação, do ano de 2013.

O objetivo da ASHRAE 55 – 2013 é de especificar as combinações de fatores ambientais térmicos e fatores pessoais e subjetivos que produzem condições ambientais favoráveis à maioria dos ocupantes de um ambiente. Os fatores ambientais a que esta norma diz respeito são temperatura, radiação térmica, umidade e velocidade do ar; os fatores pessoais são os de atividade e vestimenta. As condições térmicas especificadas por esta norma são tidas como aceitáveis para indivíduos adultos, saudáveis, em localidades de até 3000 metros de altitude, em espaços internos projetados para a ocupação humana por períodos não inferiores a 15 minutos. Por fim, esta norma não considera fatores ambientais não térmicos, como qualidade

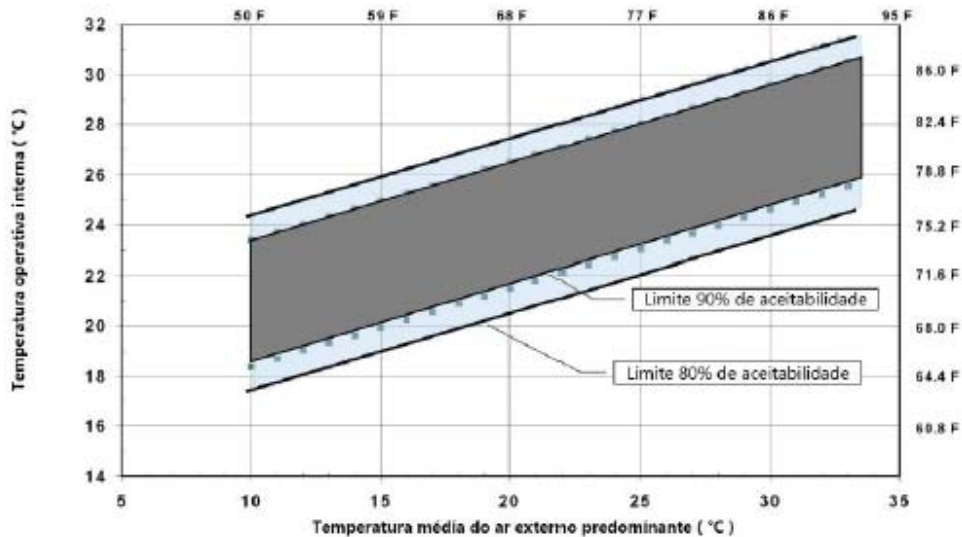
do ar, acústica, luminosa ou outros fatores físicos, químicos e biológico que podem afetar o conforto ou a saúde dos usuários.

A norma apresenta dois métodos para a avaliação do conforto térmico nas edificações: o método da aceitabilidade térmica baseado no PMV e o método da aceitabilidade térmica para ambientes condicionados naturalmente. O segundo método se aplica a ambientes ventilados naturalmente controlados pelos usuários, como é o caso das edificações residenciais unifamiliares abordadas neste trabalho. A ASHRAE 55-2013 determina que há uma relação das condições do ambiente e os fatores pessoais que determinam a aceitabilidade dos usuários. O modelo é baseado nas trocas de calor entre o ambiente e o corpo humano, assumindo que as sensações térmicas são influenciadas exclusivamente por seis fatores: os ambientais, representados por temperatura do ar, temperatura radiante do ambiente, umidade e velocidade do ar; e os fatores pessoais, que são a atividade e o isolamento térmico das roupas.

A seção 5.4 da norma aborda a determinação de condições térmicas aceitáveis em os espaços naturalmente condicionados controlados por seus usuários, através da abertura e fechamento das janelas dos ambientes. É também chamado de método de modelo adaptativo. Quando houver climatização artificial nos ambientes, seja de resfriamento ou de aquecimento, esta normativa não poderá ser utilizada. Este método se aplica a locais em que os usuários exerçam atividades com taxas metabólicas variando entre 1,0 a 1,3 met e em locais em que seja possível aos usuários a adaptação de suas vestimentas para se adaptar às condições climáticas externas e internas. Os limites aceitáveis para as vestimentas são entre 0,5 e 1,0 clo. A faixa de temperatura de conforto varia de 17oC a 31oC para aceitabilidade de 80%, e de 18,5oC a 30,5oC para 90% de aceitabilidade, conforme apresentado na Figura 9. Esta norma não pode ser aplicada em localidades em que a temperatura externa seja menor que 10oC ou maior que 33,5oC.

Para os ambientes que se encaixam nestes critérios, deve ser calculada a temperatura operativa interna. A variável a ser calculada no modelo adaptativo é a média da temperatura externa dos dias anteriores. Esta temperatura é calculada através da média aritmética da temperatura externa (bulbo seco) de um período de dias. Ela representa a amplitude térmica do ambiente ao qual os usuários tiveram que se adaptar física, psicológica e fisiologicamente ao longo dos dias. Os dias de um passado mais remoto tem menor influência nas temperaturas de conforto dos usuários do que os dias mais recentes. Portanto, a temperatura externa média deve ser feita com no mínimo 7 e no máximo 30 dias sequenciais antecedendo o dia analisado. Para cada dia deve ser calculada a temperatura média das suas 24 horas.

Figura 9: Limites de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente ventilados.



Fonte: adaptado de ASHRAE Standard 55 (2013).

A temperatura operativa interna permitida não deve ultrapassar os limites máximos e mínimos de temperatura externa. Estes limites são calculados através das equações abaixo, que representa os limites máximos e mínimos de aceitabilidade para 80% dos usuários:

$$\text{Limite superior de 80\% de aceitabilidade (}^{\circ}\text{C)} = 0,31 \times tpma(out) + 21,3$$

$$\text{Limite inferior de 80 \% de aceitabilidade (}^{\circ}\text{C)} = 0,31 \times tpma(out) + 14,3$$

Em que

$tpma(out)$ é a temperatura média do ar externo predominante.

Os efeitos a seguir já foram levados em consideração nas equações acima e, portanto, não devem ser avaliados separadamente: desconforto térmico local, isolamento pelas roupas, taxas metabólicas, umidade e velocidade do ar.

2.6 Ferramentas de simulação computacional térmica e energética de edificações

A simulação computacional é uma ferramenta que permite a avaliação integrada das opções de projeto, sob condições de operação realísticas e dá aos projetistas a oportunidade de visualizar antecipadamente o desempenho dos sistemas e tomar decisões criteriosas para melhorá-lo (CLARKE, 2001). No entanto, apesar de ser uma ferramenta multidisciplinar e abrangente (HENSEN e LAMBERTS, 2011), a simulação computacional é complexa e requer conhecimento multidisciplinar.

A análise do balanço térmico e energético dos modelos permite investigar as trocas de calor pelas superfícies e os ganhos internos para reduzir o consumo de ar-condicionado, que no Brasil é um dos principais responsáveis pelo consumo energético (DIDONÉ, 2014). A simulação do desempenho de edificações é um recurso importante através do qual é possível simular os processos físicos da edificação com baixo custo e tempo reduzido (HENSEN, 2014). Para Sorgato (2015), atualmente o uso de simulação do desempenho térmico e energético é aplicado somente na etapa de finalização dos projetos, mas deveriam ser considerados como ferramentas importantes na fase de concepção da edificação, pois auxiliam os projetistas na tomada de decisão. Para Westphal e Lamberts (2005), as principais causas são a complexidade dos programas, a dificuldade de utilização e a demora para se formar um simulador. Também é destacado por eles que a complexidade dos fenômenos envolvendo o comportamento térmico de edifícios requer uma grande quantidade de dados de entrada nas simulações, o que exige do usuário conhecimentos técnicos em diferentes áreas.

Atualmente existem diversos programas para a simulação do desempenho térmico e energético de edificações. O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2013) apresenta uma lista de programas computacionais para simulação e avaliação de eficiência energética, energias renováveis e sustentabilidade em edificações.

O *EnergyPlus* é um dos programas de simulação de edificações bastante utilizados mundialmente. Esse programa calcula as trocas térmicas, os índices de iluminação e consumo energético das edificações a partir da modelagem física do edifício e seus sistemas de ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento (DOE, 2013). O programa é, em primeiro lugar, um gerenciador de simulação, ou seja, não existe uma interface formal para o usuário, no entanto, é permitido o uso de outras interfaces desenvolvidas por uma terceira parte, que

permita modelar a geometria dos edifícios e inserir informações como dados térmicos de materiais, padrões de ocupação, dentre outros.

As simulações ocorrem a partir dos dados de entrada de um arquivo climático com dados horários e de um arquivo com a descrição do edifício inserida pelo usuário. A simulação ocorre de forma integrada. As cargas calculadas por uma ferramenta de balanço térmico em um intervalo de tempo determinado pelo usuário são repassadas para o módulo de simulação dos sistemas da edificação durante o mesmo intervalo de tempo. Este, por sua vez, calcula a resposta dos sistemas de aquecimento e refrigeração e sistema elétrico, com um intervalo variável (de até segundos). Após o cálculo há um feedback para a ferramenta de balanço térmico e vice versa (DOE, 2013). Os resultados obtidos são uma série de dados calculados, como temperaturas internas, temperaturas superficiais, ganhos internos de calor, consumo energético, trocas de ar, etc.

O *software Design Builder* é um dos programas utilizados como interface do EnergyPlus. Ele permite a análise do consumo de energia de edifícios; é validado pela ASHRAE Standard 140; modela 8760 horas por ano; modela variações horárias de ocupação, potência de iluminação, equipamentos e sistemas de ar condicionado, definidos separadamente para cada dia da semana, mês, podendo incluir feriados e períodos em que o edifício encontra-se desocupado; modela efeitos de inércia térmica; permite a modelagem de multi zonas térmicas e tem capacidade de simular as estratégias bioclimáticas adotadas no projeto, caso o edifício proposto utilize sistema de condicionamento de ar (SILVA, 2014).

2.7 Estratégias de projeto para casas ZEB em Brasília

Conforme descrito anteriormente, a cidade de Brasília tem um enorme potencial para ter casas ZEB. Dois grandes grupos de estratégias podem ser feitos, sendo o primeiro relacionado à redução do consumo de energia, e o segundo, à produção de energia. Ambos estão diretamente relacionados às condições climáticas da cidade, portanto, faz-se necessário também ter uma compreensão global acerca do clima da cidade.

2.7.1 O Clima De Brasília

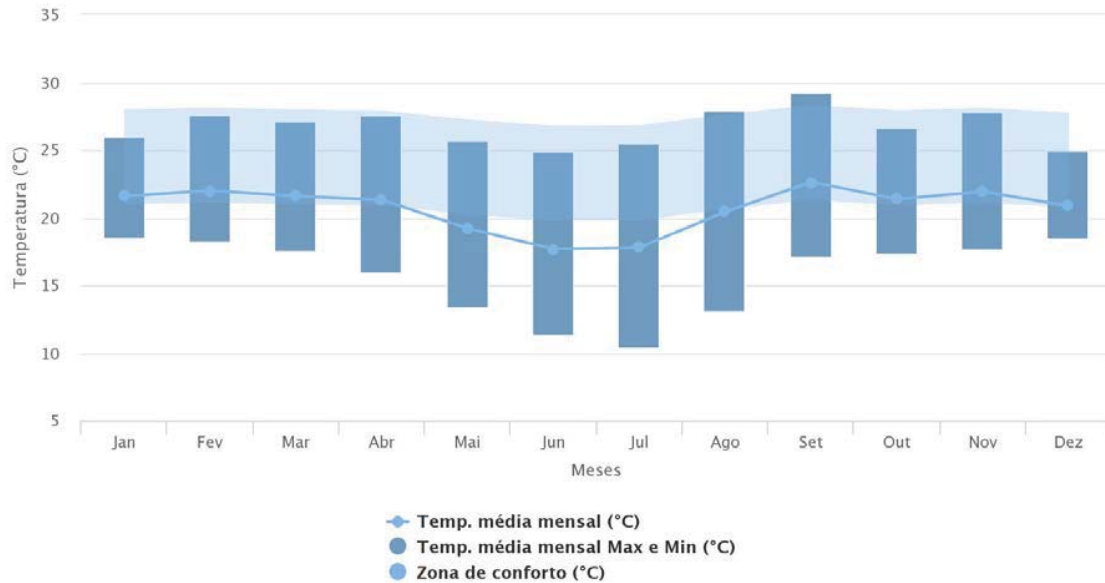
A cidade de Brasília apresenta características bastante peculiares advindas do fato de ser uma cidade totalmente planejada inclusive no que diz respeito a sua localização (MACIEL, 2002). A ideia da mudança da Capital brasileira para o interior remonta ao período colonial, e as

motivações e justificativas para a mudança eram diversas: desde aumentar a segurança (de modo a ser menos vulnerável a uma invasão marítima), até desenvolver o interior do país. Em 1892, foi efetivada a escolha da área destinada a futura capital, e para isso foi constituída uma comissão com a finalidade de demarcar o território estabelecido na Constituição de 1891. Denominada "Comissão Exploradora do Planalto Central do Brasil", sua chefia foi confiada a Luiz Cruls, diretor do Observatório Astronômico do Rio de Janeiro, (COMISSÃO LUIS CRULS, 1998 apud MACIEL, 2002). Posteriormente em 1954 uma nova comissão ficou responsável por delimitar o local exato do local de construção da cidade dentro da área já delimitada, (ROMERO, 2000). Uma das particularidades na escolha do local, para a qual se chama a atenção, foi a consideração das condições climáticas locais como critério de seleção (MACIEL, 2002). Em trecho do relatório elaborado pela missão Cruls relata-se "nutrimos, pois a convicção de que a zona demarcada apresenta a maior soma de condições favoráveis possíveis de se realizar, e próprias para nela edificar-se uma grande Capital, que gozará de um clima temperado e sadio, abastecida com águas potáveis abundantes, ..." (COMISSÃO LUIS CRULS, 1998 apud MACIEL, 2002).

Para Maciel (2002), as condições climáticas favoráveis observadas pela missão Cruls vêem-se confirmadas em trabalho apresentado por Goulart et al (1997), no qual verifica-se que a cidade de Brasília apresenta o maior percentual de horas de conforto em relação a outras 13 cidades estudadas de diferentes regiões brasileiras.

O Distrito Federal está localizado na região Centro-Oeste do Brasil, ocupando o centro-leste de Goiás. Brasília e o Distrito Federal estão localizados a uma latitude de aproximadamente 16° sul (entre os paralelos 15°30' e 16°03'), em um sítio convexo, apresentando altitude média de 1100 metros. Segundo FERREIRA (1965) e a Companhia de Desenvolvimento e Planejamento do Distrito Federal - CODEPLAN (1984), o clima de Brasília pode ser classificado como Tropical de Altitude. Como é possível observar nos climas compostos, verificam-se condições muito semelhantes ao clima tropical úmido, durante o período de chuvas, e semelhantes ao clima tropical seco no período de seca, embora não demonstrem a consistência e os extremos que lhes são característicos. O período quente e seco – verão chuvoso, de outubro a abril, tem temperaturas médias de 22°C; e o período seco e frio – inverno seco, que vai de maio a setembro, com temperaturas mais baixas entre maio e agosto, com médias de 19°C (Figura 10). Para Maciel (2002), observa-se ainda uma terceira estação dentro do período seco, com dias ensolarados, de baixa umidade relativa, e noites frias desconfortáveis, à qual se refere como fria e seca.

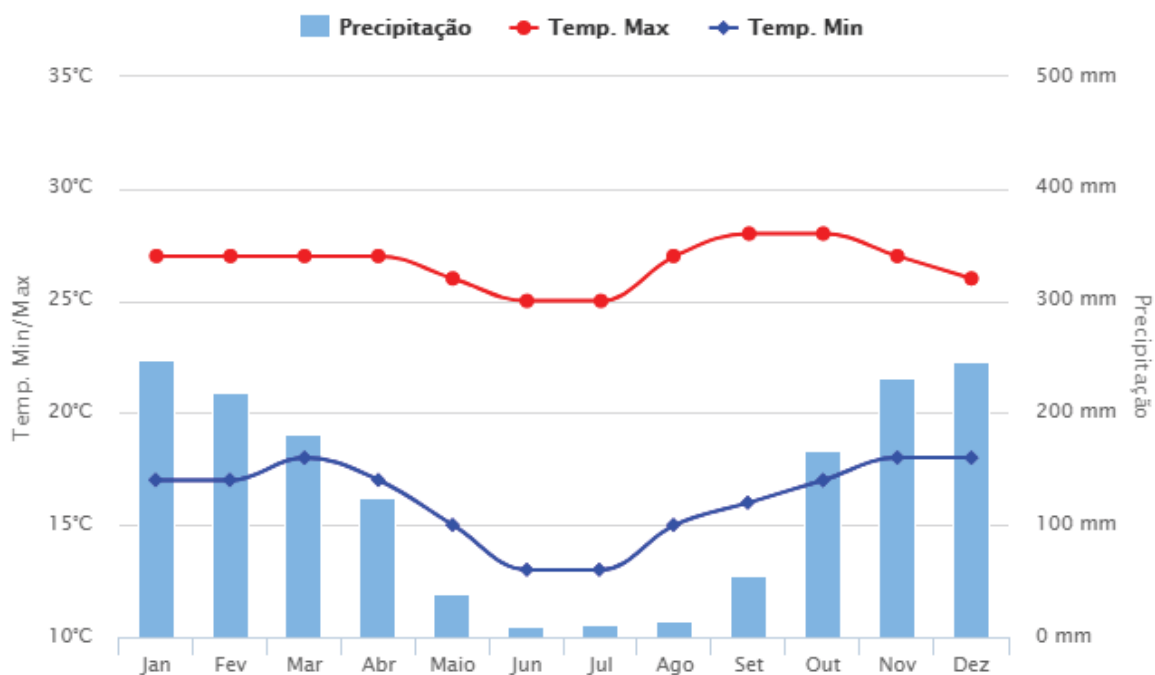
Figura 10: Temperaturas médias mensais para Brasília.



Fonte: Projeteee, 2017.

Durante o período da seca, a sensação de desconforto é muito comum devido à combinação entre a baixa umidade relativa do ar e a grande amplitude térmica diária, com altas temperaturas durante o dia e baixas temperaturas à noite. Devido à sua localização, no centro do país, e à sua altitude, estas amplitudes diárias de temperatura são consideráveis tanto no período chuvoso (amplitude média de 10°C) quanto no período seco (amplitude média de 14°C). De acordo com a CODEPLAN (1984) e os dados das Normais Climatológicas de 1960-1990, Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (1992), o período mais chuvoso corresponde aos meses de novembro a janeiro, e o período seco ocorre no inverno, especialmente nos meses de junho a Agosto (Figura 11). Na região oriental de Goiás, da qual o DF faz parte, mais de 70% do total de chuvas acontece de novembro a março. O inverno é extremamente seco, as chuvas são raras e em pelo menos um mês não há registro de nenhum dia de chuva. O período seco tem duração de 4 a 5 meses. Não somente o trimestre de inverno (junho, julho e agosto) é seco, mas também o mês que o antecede (maio) e o que o sucede (setembro). Segundo dados do INMET (1992) observa-se que o regime pluviométrico anual é de 1552mm e dezembro é o mês mais chuvoso com cerca de 248mm.

Figura 11: Precipitação anual, temperaturas mínimas e máximas.



Fonte: Climatempo, 2017.

Figura 12: Umidade relativa do ar na cidade de Brasília.

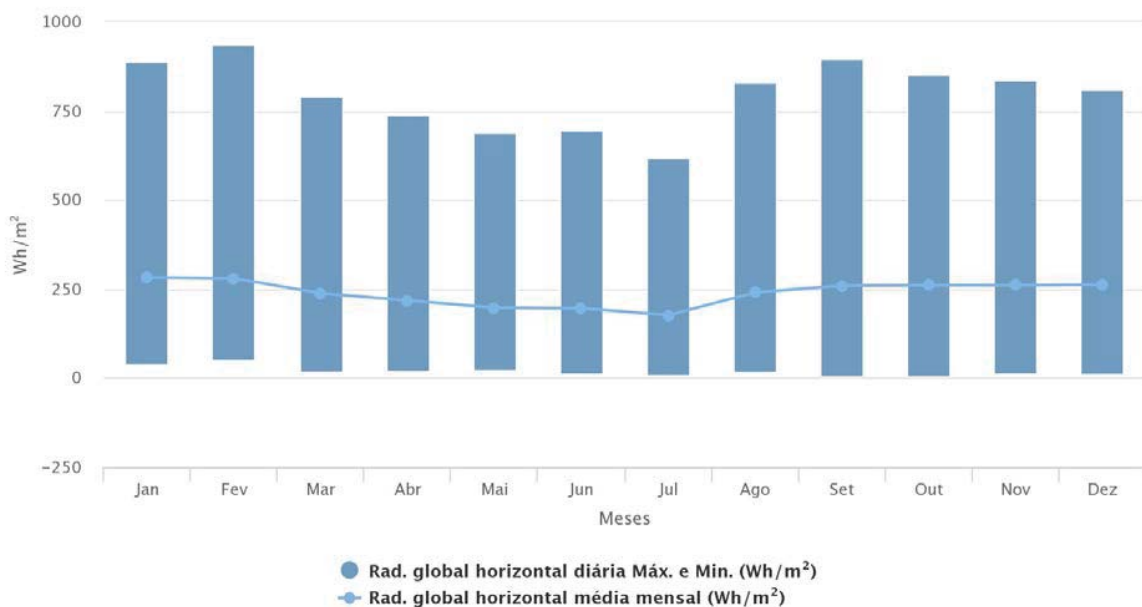


Fonte: Projeteee, 2017.

A umidade relativa do ar média anual é de 67% (Figura 12). De Abril a Setembro estes valores sofrem um decréscimo considerável, chegando a níveis abaixo de 25%. O mês mais seco é agosto, com 56% de umidade relativa do ar média. O valor mínimo absoluto já registrado foi de 8% no mês de setembro.

Em relação à duração da luz solar, os valores variam entre 2600 horas anuais, sendo a média no verão de 160 horas mensais e no inverno de 290 horas mensais. A radiação global horizontal média mensal é de 260 Wh/m² (Figura 13).

Figura 13: Radiação diária máxima e mínima mensal com valores médios para Brasília.

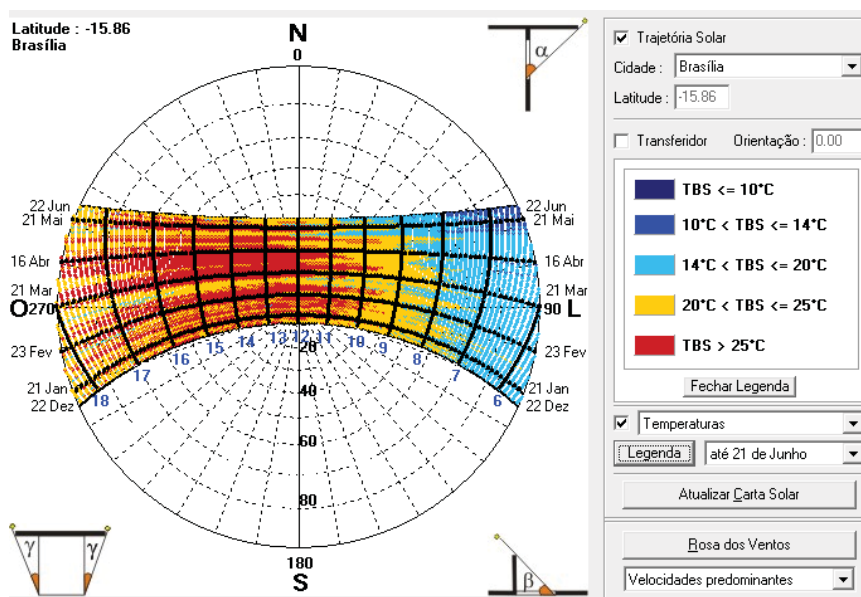


Fonte: Projeteee, 2017.

A carta solar de Brasília (Figura 14) mostra que no período do inverno os dias são mais curtos, e as temperaturas demoram a se elevar, chegando aos 20°C apenas no final da manhã. No verão, os dias são mais longos, e são registradas temperaturas diárias acima dos 25°C a partir das 9h da manhã.

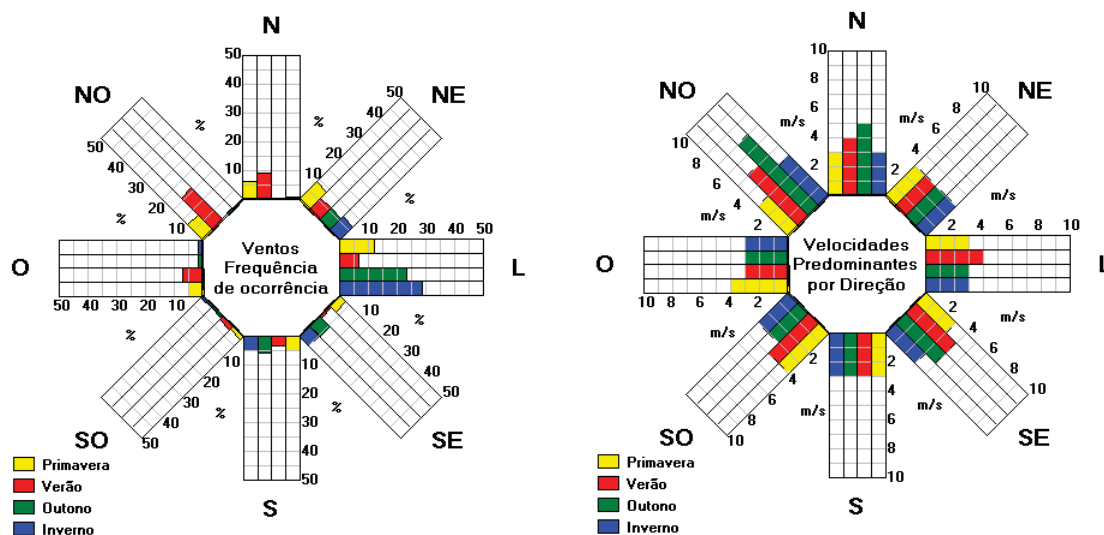
Os ventos (Figura 15), moderados e constantes, vêm de Leste (média de frequência anual), mas ventos leste e sudeste são mais comuns no inverno, e ventos noroeste, de maior velocidade, são mais comuns no verão.

Figura 14: Carta solar para a cidade de Brasília



Fonte: SOL-AR, 2009

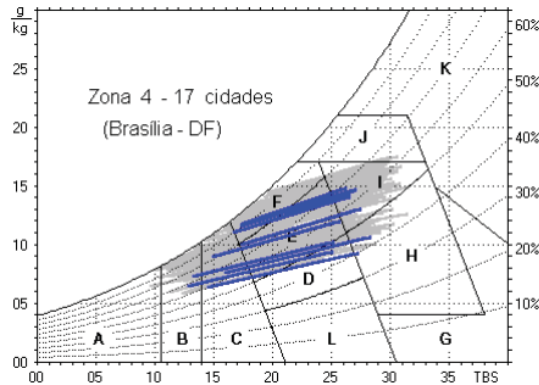
Figura 15: Rosa dos ventos para a cidade de Brasília, com indicação de frequência de ocorrência e de velocidades predominantes por direção.



Fonte: SOL-AR, 2009

A carta climática de Fanger mostra que Brasília está na maior parte do tempo dentro da zona de conforto térmico, Zona E da Figura 16.

Figura 16 – Carta bioclimática de Fanger para Brasília, Zona bioclimática 4.



Fonte: ABNT (2005).

2.7.2 Redução do consumo através de Estratégias Passivas

Em relação à redução do consumo residencial de energia elétrica, a maior parte da energia consumida em residências pode ser reduzida através da redução de uso de chuveiro elétrico, bem como do sistema de iluminação e condicionamento de ar artificiais. Para tal, estratégias passivas devem ser adotadas ainda na fase de projeto. De acordo com a NBR 15220-3 (ABNT, 2005), diferentes estratégias devem ser consideradas para o resfriamento passivo nos períodos de inverno e verão.

No verão, o uso de resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento; ventilação seletiva (nos períodos quentes, em que a temperatura interna é maior que a externa). Ventilação noturna, construções semienterradas, paredes verdes, tetos verdes e reservatório de água na cobertura podem ser utilizados para alcançar as estratégias descritas acima.

No inverno, o aquecimento solar da construção deve ser incentivado, bem como o uso de divisórias internas pesadas com alta inércia térmica. Isto pode ser alcançado através de um envelope com alta inércia térmica, como garantia de que o calor não apenas vai entrar na casa à noite, quando a temperatura está mais amena, e durante o dia o interior da casa estará mais fresca que o exterior.

A NBR 15220-3 (ABNT, 2005) também destaca estratégias para as aberturas: sombrear aberturas envidraçadas; possuir área de ventilação entre 15% e 35% da área do piso. Para as

paredes: possuir paredes externas com transmitância menor que 2,20; atraso térmico maior que 6,5 horas; e fator solar menor que 3,5. Finalmente a cobertura deve ser leve e isolada, com transmitância igual ou menor a 2,3; atraso térmico de 3,3 horas e fator solar menor que 6,5.

2.7.3 Redução do consumo através da eficiência energética

Há ainda as estratégias ativas para redução do consumo, que são aquelas em que a eficiência energética dos equipamentos e a consciência do usuário influenciam diretamente na economia. Estas estratégias podem alcançar bons resultados, mas é necessária a educação e a conscientização dos usuários, além do investimento financeiro em equipamentos mais eficientes, que tendem a se pagar ao longo do tempo através da economia gerada.

2.7.4 Produção de Energia e Estratégias Proativas

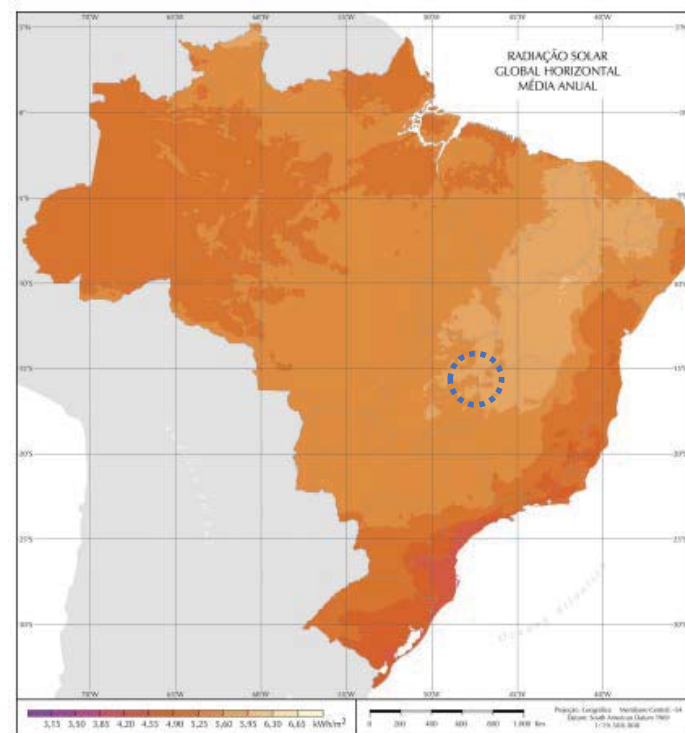
O terceiro grupo de estratégias para balanço energético nulo em Brasília diz respeito à geração local de energia renovável. A cidade possui enorme potencial para aquecimento solar da água, que já tem sido bastante utilizado em residências novas. Este potencial pode também ser utilizado para a geração de energia elétrica através de células fotovoltaicas.

Recentemente foi publicado um estudo que analisa o potencial regional para a implantação de NZEBs no Brasil. Se trata de uma definição climática, e uma de suas conclusões é que a região mais propícia para os ZEBs no país é a de Brasília e seus arredores, região com um clima naturalmente agradável (se comparado aos índices gerais de conforto térmico). Este potencial também é alto devido à combinação de temperatura externa do ar, umidade relativa, e irradiância global solar (DOMINGOS, 2014). A Figura 17 mostra que no centro do país é onde se tem maiores valores de radiação solar anual. Em relação a produção de energia eólica, a cidade não apresenta um custo-benefício favorável. Por isso, neste trabalho, o foco nas estratégias proativas será voltado para as tecnologias fotovoltaicas.

A atual disponibilidade de baterias residenciais tornou a tecnologia fotovoltaica mais interessante, já que em uma casa grande parte da energia produzida durante o dia será usada à noite, apesar de ainda não terem chegado ao mercado brasileiro e serem muito caras. De todo modo, estudos realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2014) mostram que em dois anos os sistemas fotovoltaicos serão economicamente mais viáveis aos consumidores.

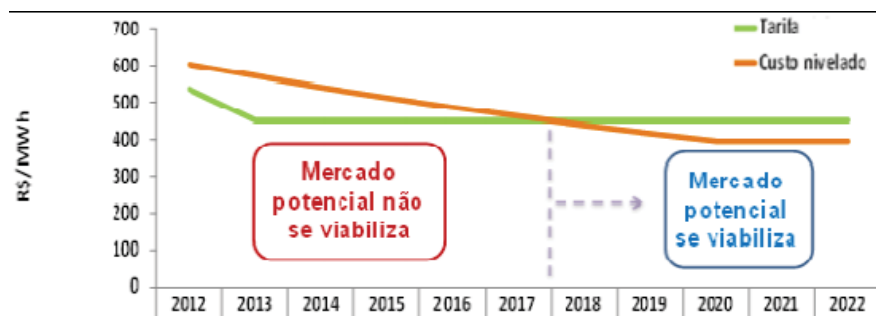
A Figura 18 mostra que ao passo que as tarifas energéticas aumentam, e a tecnologia passa a ser fabricada no país, estes sistemas se tornarão mais populares.

Figura 17 – Radiação solar anual média no Brasil.



Fonte: Pereira et al (2006).

Figura 18 – Estimativa da viabilidade econômica da fonte fotovoltaica no Brasil



Fonte: EPE (2014)

A geração autônoma de energia em residências é muito interessante para a cidade como um todo, pois toda a energia gerada durante o dia (quando o consumo na casa é menor) pode ser devolvida à rede para que edifícios comerciais, industriais e etc. a utilizem. No entanto, a

educação dos usuários deve ser levada em conta, para que tenham a consciência que a redução do consumo deve ser trabalhada e mantida, mesmo com a produção própria de energia.

Enquanto as baterias para armazenamento da energia elétrica fotovoltaica produzida durante o dia para permitir o uso à noite ainda são muito caras, e tem pouca disponibilidade no mercado brasileiro, a saída mais viável é adequar o medidor de entrada de energia à resolução da ANEEL⁸ (2012), que permite que a energia gerada durante o dia e não utilizada retorne à rede. Isso faz com que seja gerado um crédito na conta de energia elétrica ao fim de cada mês, e que a energia elétrica gerada nas casas seja utilizada em edifícios comerciais, industriais, de serviços e etc.

2.9 Considerações finais sobre a revisão de literatura: estratégias de projeto para casas ZEB em Brasília

No Brasil há evidências que vêm aumentando a porcentagem de edificações residenciais que possuem ar condicionado (SORGATO, 2015). Desta forma, é importante ter normas de desempenho térmico e o regulamento de eficiência energética em edificações que avaliem o desempenho com condições próximas do real. Para Sorgato (2015), as normas vigentes de desempenho térmico e o regulamento de eficiência energética para edificações residenciais não consideram a influência do comportamento do usuário nas avaliações de desempenho, ou mesmo a presença do usuário nos ambientes (como é o caso da NBR 15575) ou os diferentes padrões de uso de equipamentos e sistema de iluminação artificial (como é o caso do RTQ-C).

Uma forma de avaliar a influência do comportamento do usuário é através das simulações termo energéticas, que possibilitam avaliar uma gama de parâmetros. A simulação tem a vantagem de ter um baixo custo quando comparada aos experimentos in loco (SORGATO, 2015). Considera-se que atualmente a norma que leva em conta os diferentes padrões de uso, ocupação e iluminação do usuário em relação a avaliação de ambientes naturalmente ventilados é a norma ASHRAE 55 - 2013. Além disso, esta norma trata do conceito de conforto adaptativo, e tem parâmetros de temperaturas mínimas e máximas que se adequam ao clima da cidade Brasília, que será utilizada como base deste estudo.

⁸Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL prevê que a energia gerada durante o dia que não for utilizada pode ser devolvida à rede, e o usuário recebe um crédito em sua conta de energia ao fim do mês. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>> Acesso em 06/08/2016.

3. REVISÃO DE LITERATURA: CASAS PRÉ FABRICADAS

3.1. As casas pré fabricadas e as revoluções industriais

A Primeira Revolução Industrial ocorreu na Inglaterra, no século XVIII (1780-1830). A Inglaterra foi o primeiro país a passar por esta revolução, que por volta de 1830 migrou para o continente europeu, atingindo primeiramente Bélgica e França. Por volta dos meados do século XIX, atravessou o Atlântico e rumou para os Estados Unidos. E, no final do século, retornou ao continente europeu para retomar seu fio tardio na Alemanha e na Itália, chegando, também, ao Japão.

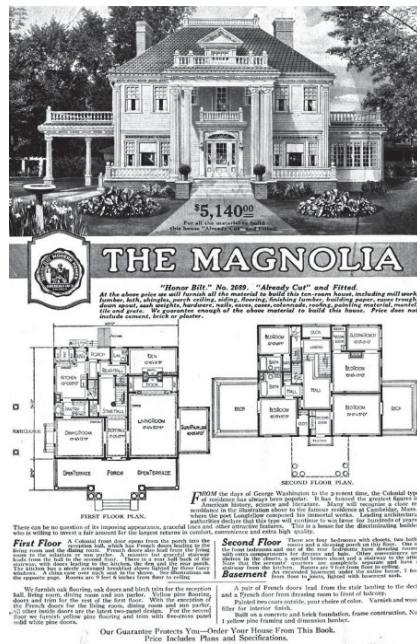
A Segunda Revolução Industrial começou por volta de 1870. Mas a transparência de um novo ciclo só se deu nas primeiras décadas do século XX. Foi um fenômeno muito mais dos Estados Unidos que dos países europeus. É esta segunda revolução industrial que está por trás de todo desenvolvimento técnico, científico e de trabalho que ocorre nos anos da Primeira e, principalmente, da Segunda Guerra Mundial. A Segunda Revolução Industrial tem suas bases nos ramos metalúrgico e químico. Neste período, o aço torna-se um material tão básico que é nele que a siderurgia ganha sua grande expressão. A indústria automobilística assume grande importância, e o trabalhador típico desse período é o metalúrgico. A forma mais característica de automação é a linha de montagem, criada por Ford em 1920, com a qual introduz na indústria a produção padronizada, em série e em massa, que tornou-se conhecido e utilizado em todo o mundo industrial. As tecnologias características desse período são o aço, a metalurgia, a eletricidade, a eletromecânica, o petróleo, o motor a explosão e a petroquímica, tendo a eletricidade e o petróleo como principais formas de energia. A principal característica do período técnico da Segunda Revolução Industrial foi a separação entre concepção e execução, separando quem pensa (o engenheiro) e quem executa (o trabalhador em massa).

Unindo o contexto da produção em massa, e do período pós-guerra, com milhares de pessoas que perderam suas casas no mundo todo, a ideia da produção de habitações em massa torna-se realidade, e passa por experimentos, protótipos, projetos de toda sorte. Ao longo do século 20, muitos arquitetos mundialmente famosos lideraram as pré-técnicas de construção para o baixo custo, numa tentativa de reformular a concepção das pessoas, no que diz respeito às

casas pré-fabricadas. Neste contexto, o movimento modernista na Europa como um todo vem a revolucionar o modo de pensar e construir arquitetura, e até mesmo o modo de habitar.

Não se sabe ao certo qual foi a data de construção da primeira casa pré-fabricada, mas seu conceito manteve-se o mesmo durante os últimos dois séculos. Refere-se a diversos tipos de sistemas de construção em que uma casa é totalmente ou parcialmente construída ou montada em uma fábrica. A empresa Sears, Roebuck e Co. teve grande sucesso com casas pré-fabricadas entre 1908 e 1940. O revendedor estima ter vendido algo em torno de 75 mil kits de casas pré-fabricadas durante esse período, tanto aos trabalhadores de classe média que se deslocavam para fora das cidades e dos subúrbios em crescimento rápido e a famílias ricas que procuravam casas de férias, a baixo custo. Nos seus arquivos online, Sears cita duas razões para o sucesso dos seus kits de casas pré-fabricadas. Em 1º lugar, a empresa ofereceria tantos como 447 projetos diferentes, que vão desde o Ivanhoe multistorey à Goldenrod com três quartos, sem quarto de banho. Sears ainda permitia que os clientes apresentassem projetos personalizados para a casa pré-fabricada. Isso tornava os kits das casas, atraentes a vários tipos de consumidores. Em 2º lugar, os kits incluem estruturas de balão, paredes de gesso e telhas de asfalto. Cada um destes componentes simplifica o processo de construção e aumenta a resistência (ao fogo) da estrutura.

Figura 19: exemplo de casa do catálogo da Sears



Fonte: <http://www.searsarchives.com/homes/1915-1920.htm>

A casa móvel – construída numa fábrica e transportada em uma ou duas peças para o seu destino final, tornou-se o modelo dominante das casas pré-fabricadas nos Estados Unidos depois do ano de 1945. O preço de compra acessível destas casas tornava-as particularmente atraentes aos muitos veteranos que regressavam da Segunda Guerra Mundial. As casas pré-fabricadas erguidas de concreto, plástico e estruturas de aço desfrutaram de mais sucesso fora dos Estados Unidos durante o período pós-guerra. No Japão, por exemplo, as casas pré-fabricadas são responsáveis por 20 por cento do mercado da habitação.

A Terceira Revolução Industrial tem início na década de 1970, tendo por base a alta tecnologia, a tecnologia de ponta (HIGH-TECH). As atividades tornam-se mais criativas, exigem elevada qualificação da mão-de-obra e têm horário flexível. É uma revolução técnico-científica, tendo a flexibilidade do toyotismo, cujas características foram desenvolvidas pelos engenheiros da Toyota, indústria automobilística japonesa, cujo método foi abolir a função de trabalhadores profissionais especializados para torná-los especialistas multifuncionais, lidando com as emergências locais anonimamente. Sua base mistura a Física e a Química, a Engenharia Genética e a Biologia Molecular. O computador é a máquina da terceira revolução industrial.

A organização do trabalho sofre então uma profunda reestruturação. Resulta um sistema de trabalho polivalente, flexível, integrado em equipe, menos hierárquico. Computadorizada, a programação do conjunto é passada a cada setor da fábrica para discussão e adaptação em equipe, na qual se converte num sistema de rodízio de tarefa que restabelece a possibilidade de uma ação criativa dos trabalhadores no setor.

A década de 1970 também foi marcada pelo início da preocupação mundial com a questão da eficiência energética e da sustentabilidade, por conta da primeira crise do petróleo, em 17 de outubro de 1973. Tal fato deflagrou um processo na história dos edifícios no cenário internacional: regulamentos visando à redução do consumo energético em edifícios e políticas de incentivo com o mesmo fim. A eficiência energética e a preocupação com a escassez dos recursos naturais nasceram portanto em um contexto de crise, e permanece atual em razão do sucesso das ferramentas legais utilizadas e do avanço tecnológico proporcionado pelo ambiente de crise e de elevações tarifárias. A partir desta data torna-se impraticável pensar edificações sem levar em conta diversos fatores que possam propiciar economia de energia e redução do uso de combustíveis fósseis de um modo geral.

Segundo Knapp (2013), com a proliferação de casas pré-fabricadas muito baratas em todo os EUA na década de 1970, não é de admirar que um forte estigma siga a pré-fabricação das habitações por toda a parte. Nas últimas décadas do século XX, a pré-fabricação foi muitas

vezes comparada à construção de baixa qualidade, que não é facilmente personalizada, desejada ou culturalmente significativa. Isso somado ao predomínio contínuo das tipologias de habitação pré-fabricadas produzidas por arquitetos que continuam a ser inacessíveis para o consumidor típico e têm vida útil indeterminada resultou realmente num fracasso da tipologia.

Para Oberhaus (2015), o mundo industrial está às vésperas de viver mais uma revolução. O digital começa a se unir à realidade, através da área da TI e da comunicação que trabalham juntas para transformar processos industriais tradicionais, alterando as várias áreas de produção. A quarta revolução industrial, mais conhecida como "Indústria 4.0", foi nomeada assim por um grupo liderado por empresários, políticos e acadêmicos, que a definiram como uma forma de aumentar a competitividade da indústria alemã por meio da inserção de "sistemas cyber físicos", ou CPS, aos processos industriais. A Indústria 4.0 é o equivalente industrial da Internet das Coisas, a ideia de conectar toda sorte de objetos à internet. Esse seria um "novo conceito em produção", de acordo com o um relatório publicado em 2013 pelo Grupo de Pesquisa da Indústria 4.0, um conglomerado de industriais, especialistas em inteligência artificial, economistas e acadêmicos. O governo alemão apoiou a ideia, anunciando que o país iria adotar uma "Estratégia De Tecnologia de Ponta" para se preparar para o futuro.

Essa nova abordagem não está ganhando popularidade apenas na Alemanha; muitos países estão voltando seus olhos para a iniciativa. Os Estados Unidos, por exemplo, não demoraram para seguir os passos da Alemanha e criaram uma organização sem fins lucrativos voltada para o tema, o Consórcio de Internet Industrial, em 2014.

Além disso, as preocupações de projeto arquitetônico hoje em dia não podem mais não levar em consideração as questões energéticas e ambientais, por uma questão até de ética profissional, de compromisso com as futuras gerações, com as cidades, com o planeta. Desta maneira, a tecnologia oferece amplo auxílio na busca por soluções mais ambientalmente corretas e mais eficientes do ponto de vista do consumo energético. Isso se deve pela facilidade e ampla disseminação de técnicas computacionais como as simulações de desempenho, por exemplo, e também à ampla gama de materiais e processos construtivos cada vez mais eficientes, mais inteligentes.

Para Giedion (2004), a indústria, ao tentar pela primeira vez produzir em massa casas idênticas, como automóveis, teve de aprender a duras penas que as casas, diferentemente dos automóveis, exigem o respeito à flexibilidade individual e que tudo o que a indústria pode fazer é descobrir os melhores meios para criar partes que possam ser montadas de tal modo que a necessária diversidade seja garantida.

Neste sentido, a internet tem sido a ferramenta fundamental para a customização de casas pré-fabricadas. Através de websites, as empresas disponibilizam softwares aos usuários, que podem montar suas casas como melhor convém. Isso é possível através de projetos modulares, em que os módulos da habitação podem ser conectados da maneira que o consumidor final achar melhor. Além disso, o consumidor sabe em tempo real quanto vai custar sua casa, e em quanto tempo ficará pronta.

3.2 A casa mínima e a flexibilidade como necessidade

Retomando neste capítulo a contextualização da produção em massa, e do período pós-guerra, com milhares de pessoas que perderam suas casas no mundo todo, a ideia da produção de habitações em massa torna-se realidade, e passa por experimentos, protótipos, projetos de toda sorte. Entre 1920 e 1930 houve então um período em que a era moderna tratou intensamente da questão “habitação mínima urbana”.

Uma vez que a habitação passa de um problema pessoal para um problema global, surge a necessidade de adaptação das cidades do pós-guerra para que as pessoas possam ser abrigadas. Neste contexto, o debate sobre a habitação e sua inserção urbana ganhou grande importância, sobretudo nos Congressos Internacionais de Arquitetura Moderna – CIAMs. Superpopulação, condições precárias de higiene e edificações inseguras eram comuns nas cidades em crescimento. A forma mais conhecida de habitação para os trabalhadores eram construções que ocupavam todo o espaço disponível do lote ou de uma quadra, prejudicando imensamente as condições de ventilação e iluminação. Essa era uma realidade no século XIX na Europa e nos Estados Unidos, observada no Brasil mais tardiamente, no início do século XX.

Diante do confuso e acelerado crescimento populacional das cidades, fazia-se necessária a criação de normas espaciais para habitações, que acabaram surgindo em concomitância com a necessidade de standardização para produção em massa, devido ao déficit habitacional cada vez maior. A concepção de normas padronizadas para se viver deriva então do novo tratamento científico do comportamento humano, que passou a ser estudado sob parâmetros normativos e mensuráveis. A importância da teoria de projeto no âmbito em que estas normas foram pensadas e criadas é tal que até os dias de hoje as normas ABNT, códigos de obras e edificações, Normas de Uso e Gabarito (dentre outras), regem praticamente todas as edificações construídas no meio urbano. E mais importante, são normas que se modificam e evoluem conforme a necessidade e adaptação da sociedade, que por sua vez também se

modifica e evolui – por exemplo a recente discussão e readequação do Código de Obras e Edificações do Distrito Federal.

O II CIAM, ocorrido em Frankfurt-am-Main no ano de 1929, teve como principal tema o “Padrão Mínimo”. As primeiras regulamentações definiam os padrões dimensionais mínimos com base em fatores de segurança e saúde. Somente no início do século XX apareceram outras bases para definição do mínimo para a habitação. Muito mais do que uma simples relação de metragem quadrada por pessoa, acrescentou-se o critério do mínimo social no debate sobre a *Existenz minimum* (habitação para o mínimo nível de vida) durante o Congresso. A concepção de uma habitação mínima envolveria resoluções de amplas necessidades biológicas e psicológicas no sistema estático da construção em si – era a busca pelo essencial, deixando de lado tudo aquilo que era supérfluo para a existência humana. Segundo os participantes desse congresso, a habitação mínima era um instrumento social indispensável para a nova era e, na retórica positivista, incorporava um apelo à precisão científica para superar costumes tradicionais (ROWE, 1995).

Durante o II CIAM, Le Corbusier e Pierre Jeanneret defenderam que, para resolver o problema da habitação mínima, seria preciso aplicar métodos novos e simples, que permitissem elaborar os projetos necessários e se prestassem naturalmente à estandardização, à industrialização e à “taylorização”. As funções da vida doméstica exigem espaços cuja capacidade mínima pode ser fixada com precisão. Após a definição da “capacidade mínima tipo” para cada função, pode-se estabelecer um esquema dessas funções e formar um jogo de superfícies e suas contiguidades. Até o momento, havia uma compartimentação dos espaços muito estrita à estrutura dos edifícios, em que um ambiente era acessado por aqueles contíguos a ele. Com a evolução das técnicas construtivas e dos materiais – aço e concreto principalmente, era possível pensar em uma espacialização diferente das funções domésticas, possibilitando uma estandardização, através da qual a indústria pode produzir em série a baixo custo. Tudo isso baseava-se na existência de uma indústria potente, que transformaria cada vez mais os materiais naturais em artificiais ou em materiais novos, como o cimento, ferros perfilados, materiais isolantes, utensílios metálicos e produtos impermeáveis.

Em Viena, onde foi implantado um vasto programa entre 1929 e 1934, que pretendia planejar e resolver a questão da habitação para trabalhadores, sem querer representar um modelo ou ser referência ideal, construíram-se habitações de 21 m² para pessoas solteiras, de 40 m² com dois dormitórios e, por fim, apartamentos de 57 m² com três dormitórios (AYMONINO, 1973). Ernst May chamava a atenção para a necessidade de resolver os problemas técnicos individuais da habitação mínima antes de saber o quanto sua área poderia ser reduzida. A área mínima

por pessoa variava de 12,5 a 14 m², principalmente nos projetos de Ernst May dos conjuntos habitacionais de Frankfurt. Le Corbusier chegou a um valor de 14 m² por pessoa, a que chamou de “unidade biológica” ou “célula”.

Para Smithson e Smithson (2001), a questão da flexibilidade como uma necessidade imposta para resolver a questão das possibilidades inúmeras de combinação dos eletrodomésticos por volta dos anos 1920, no contexto da casa como máquina ou da casa eletrodoméstico. A Casa Eletrodoméstico, citada pelos autores, previam cubículos próprios em zonas definidas para esses equipamentos e acabavam por definir a habitação. Transportando este conceito para os dias atuais, ou pelo menos no fim do século XX, Eleb Vidal (1994) indica a flexibilidade como um dispositivo próprio na primeira metade século XX, criticada na segunda metade do século, e retomada no seu final, para a habitação, influenciada pelos espaços de escritório. No entanto, para esses autores, a flexibilidade atualmente se impõe como necessidade frente à velocidade com que a sociedade – e por consequência a forma como se usa a habitação – muda (ELEB-VIDAL et al, 1994). Nesse sentido, os autores citam Alain Colquhoun (1921-2012), em declaração de 1977, para quem “As exigências da vida moderna são tão complexas e mutantes que todas as tentativas de as antecipar por parte do arquiteto levam a edifícios inadequados para a sua função”. (ELEB-VIDAL et al, 1994). Para esses autores a casa já não é formada por um conjunto de quartos: é um espaço sem funções e sem divisórias, um espaço uniforme, destinado, em sua neutralidade, à habitação. Seria, nas palavras dos autores, “um espaço a conquistar” (ELEB-VIDAL et al, 1994).

A arquitetura passava então a ter uma base científica, buscando inspiração no racionalismo e na experimentação. Alguns temas como a tecnologia e a engenharia, efeitos de saúde pública das diferentes zonas construídas, compreensão das relações sociais básicas que podem afetar a privacidade e demais arranjos espaciais passaram a ser explorados mais intensamente pelos arquitetos (ROWE, 1995). Entretanto, segundo Gropius (1997), a racionalização não deve ser considerada como a principal característica da arquitetura moderna, mas apenas uma parte do processo purificador. A outra parte, a satisfação de nossas necessidades interiores, é tão importante quanto a dos materiais. Ambas pertencem à unidade da vida. A libertação da arquitetura do caos decorativo, a ênfase nas funções de suas partes estruturais, a busca de uma solução concisa e econômica é apenas o lado material do processo criativo do qual depende o valor prático da nova obra arquitetônica. Bem mais importante, porém, que essa economia funcional, é a produção intelectual de uma nova visão do espaço no processo de criação arquitetônica. Assim, ao passo que a prática arquitetônica é problema da construção e

do material, a essência da arquitetura repousa no assenhramento da problemática espacial. (GROPIUS, 1997)

3.3 A customização como elemento de individualidade

De acordo com Giedion (2004), Walter Gropius havia demonstrado uma certa afinidade com a técnica construtiva americana e sua produção e montagem em grande escala. Em 1909 – durante a época em que trabalhou no escritório de Peter Behrens – ele apresentou ao industrial alemão Emil Rathenau “uma proposta de constituição de uma empresa que realizasse a construção de habitações com componentes padronizados”. Em seu “Memorandum” apresentado à AEG, companhia alemã de produtos elétricos, defendeu a pré-fabricação, industrialização e conseqüente standardização da habitação no “Programa para a criação de uma companhia para a construção de habitações com base em princípios estéticos consistentes”. Essa ideia esteve presente em seu período de Bauhaus e em sua produção posterior:

- Uso de partes iguais e materiais em todas as casas: quase todas as partes da casa podem ser produzidas em fábricas. Todas as formas, cor, material e equipamentos internos seriam catalogados. Com dimensões padronizadas, as partes se combinariam perfeitamente e permitiriam a intercambialidade, produzindo uma infinidade de combinações. O cliente poderia compor sua casa conforme seu gosto, escolhendo entre todos esses materiais e formas;
- Uso múltiplo de projetos: os tipos de casa, variando em tamanho, distribuição e conforme o desejo do cliente, estariam prontos com os desenhos e especificações das partes necessárias. Assim, a casa seria projetada, independentemente do local onde fosse montada e concebida, para atender às necessidades de um homem civilizado moderno de qualquer país. A ideia do estabelecimento de necessidades internacionais supunha que os costumes nacionais desapareceriam e o modelo de habitação transcenderia as fronteiras nacionais. Para atender diferentes classes sociais, existiriam tipos diferentes de casa;
- Unidade arquitetônica da região: o aspecto visual, a repetição das edificações, os jardins, as esquinas poderiam ser tratadas como uma unidade, um todo. Diferentes empresas poderiam tratar da construção de cada parte do bairro ou da cidade. Essa unidade valorizaria a área, incrementando a rentabilidade dos empreendedores.

Gropius declara no final dessa proposta de vinte e oito páginas, não publicada: “Hoje se faz economicamente e tecnicamente viável satisfazer as exigências legítimas do cliente com relação ao tratamento individualizando de sua moradia, utilizando-se as possibilidades infinitas de combinação dessas componentes variáveis”. Assim, em 1910, Walter Gropius percebeu o problema crucial do papel que a mecanização tinha de desempenhar na produção de moradia em larga escala. O problema consiste na reconciliação das necessidades individuais com a produção mecânica para produzir uma solução que pudesse satisfazer as diversas exigências humanas.

Gropius defendia a padronização como uma função da sociedade humana, desejo de reproduzir uma boa forma standard. Era como se a existência de um produto padrão caracterizasse o apogeu de uma civilização, havendo uma seleção de qualidade e uma separação entre o pessoal e o ocasional, o essencial e o supra pessoal. Portanto, o conceito “standard” deve ser tomado como um título cultural honroso e chama a atenção que nem todos os produtos industriais possam ser elevados a esta categoria. Para ele, não seriam a padronização e a pré-fabricação as provocadoras de casas como produtos estereotipados. A própria competição do mercado livre se encarregaria de criar uma variedade de partes pré-fabricadas, assim como os demais artigos de consumo produzidos industrialmente. No entanto, ressaltava a necessidade de uma constante revisão e renovação das formas padronizadas, para que não se tornassem superadas (GROPIUS, 1997).

Também no ponto de vista de Le Corbusier (1994), a criação de padrões era necessária para se atingir a perfeição. Para ele, até mesmo as emoções se enquadravam em padrões. O padrão é uma necessidade de ordem trazida para o trabalho humano. O padrão se estabelece sobre bases certas, não arbitrariamente, mas com a segurança das coisas motivadas e de uma lógica controlada pela análise e pela experimentação. Todos os homens têm o mesmo organismo, mesmas funções. Todos os homens têm as mesmas necessidades. O contrato social que evolui através das idades determina classes, funções, necessidades padronizadas, gerando produtos de uso padronizado.

“A casa é um produto necessário ao homem. O quadro é um produto necessário ao homem, por responder a necessidades de ordem espiritual, determinadas pelos padrões da emoção. (...)Estabelecer um padrão é esgotar todas as possibilidades práticas e razoáveis, deduzir um tipo reconhecido conforme as funções, com rendimento máximo, com emprego mínimo de meios, mão-de-obra e matéria, palavras, formas, cores, sons.” (LE CORBUSIER, 1994, p. 89)

Sobre a humanização no movimento moderno, Evans (2000) fala muito sobre Alvar Aalto, relacionando ainda sua aparição em mais de 40 páginas do livro de Giedion (2004). A racionalidade já havia sido atingida, e era hora de retornar a uma certa irracionalidade, que Giedion via no trabalho de Aalto. A irracionalidade era necessária para trazer de volta o mundo aos humanos, pois os edifícios racionais haviam se tornado a causa da alienação dos arquitetos acerca da natureza e da sociedade. Nas palavras do próprio arquiteto em seu livro *A humanização da arquitetura*, “ao invés de brigar com a mentalidade racional, a mais nova fase da arquitetura moderna tenta projetar métodos racionais para o campo humano e psicológico.”

Para Giedion (2004), a indústria, ao tentar pela primeira vez produzir em massa casas idênticas, como automóveis, teve de aprender a duras penas que as casas, diferentemente dos automóveis, exigem o respeito à flexibilidade individual e que tudo o que a indústria pode fazer é descobrir os melhores meios para criar partes que possam ser montadas de tal modo que a necessária diversidade seja garantida. Neste sentido, a customização das casas fabricadas em massa passa a ter uma importância chave para seus projetos, pois cada habitante, cada família terá seus anseios e suas expectativas quando se trata de como idealizam sua própria casa. Apesar de a variedade ser valorizada pelos clientes, o excesso de opções também pode tornar o processo de customização confuso, reduzindo sua vantagem competitiva. Assim, o processo de customização deve identificar quais atributos dos produtos estão relacionados com as necessidades dos clientes e selecionar quais customizações serão disponibilizadas nesses atributos para atender estas necessidades.

De acordo com Peters (2007), na sua obra, Jean Prouvé perseguiu tudo menos a criação do monumental. A sua principal preocupação era passar aos seres humanos a noção de viver num ambiente moderno, flexível e variável. Para ele, isso significava que os edifícios tinham que ser mais desenvolvidos, alterados e repensados, tal como os automóveis e os aviões. Jean Prouvé “dedicou sua vida a integrar a indústria e a arquitetura como forma de encorajar os aspectos humanos no nosso ambiente” (PETERS, 2007), ultrapassando uma aplicação do modernismo meramente voltada para a estética. Não se interessava de forma alguma apenas pela montagem de elementos de construção pré-fabricados, mas na exploração em profundidade de um determinado material, as suas possibilidades expressivas e econômicas, seu significado social. Segundo Peters (2007), até mesmo o arquiteto Jean Nouvel caracterizou resumidamente sua obra com as seguintes palavras: “raramente a ética conseguiu criar uma beleza tão clara.”

Apesar disso, essa beleza não era compreendida por grande parte da população, pois a sociedade na época do pós-guerra era extremamente cética em relação ao método de

construção industrializado. Tais edifícios eram associados a estruturas provisórias e alojamentos para pobres. As reformas de Prouvé à criação de um espaço e sala de estar inovador e multifuncional (atualmente evidente) não eram bem compreendidas e encontravam grande resistência dos consumidores.

3.4 Flexibilidade e adaptabilidade

Para Saleiro Filho (1994), a flexibilização é uma questão natural: a noção de flexibilidade é própria das origens da habitação, da ideia de que um habitat deve se amoldar facilmente às mudanças da vida humana. Era primeiro uma necessidade – no nomadismo, passando por uma questão cultural – Japão a partir dos séculos VII e VIII, para se converter em uma estratégia racional de projeto e de mercado – na Europa e EUA a partir do século XIX.

No Japão, a flexibilidade na arquitetura se destacou pela polivalência dos usos ao longo do dia, a não atribuição de funções específicas aos espaços e a utilização de elementos leves e de compartimentação. Eram produzidos espaços com neutralidade, zonas sem a definição de uma disposição prévia, destacando o ambiente criado e não se importando com a função (SALEIRO FILHO, 1994).

Na aplicação burguesa Americana do século XIX, a arquitetura era padronizada, importando a versatilidade dos espaços. A lógica da flexibilidade transcende à necessidade, à cultura, e ganha a ótica do mercado imobiliário, como os blocos de apartamentos para aluguel na Alemanha citados por Saleiro Filho (1994). Ainda nessa lógica, para Saleiro Filho (1994) a flexibilização passa a possibilitar a habitação mínima, com a expansão das sobreposições de atividades cotidianas. Passa a tratar da economia de espaço, exemplificado por Chicago no final do século XIX.

Para Bergdoll e Christensen (2008), a pré-fabricação como um sistema iniciou com Ernst May e Le Corbusier nos anos 1910/20, ao propor que criar um edifício pré-fabricado era, em essência, reprojeter e repensar a própria arquitetura, ou seja, começar a dar respostas arquitetônicas à tecnologia da pré-fabricação. Para os autores, a *Maison Dom-ino* se tornou um marco na fundação de uma teoria da arquitetura, no sentido da racionalização da construção, mas também da forma de produção do espaço.

Muito embora a pré-fabricação não tenha surgido nessa época, é no século XX que ela tem uma importância maior no sentido de se alterar a forma de pensar o espaço e seus usos. Nesse sentido, segundo Bergdoll e Christensen (2008), Gropius propôs um sistema aberto no qual o

arquiteto e o cliente de classe média poderiam criar juntos um edifício que expressaria suas respectivas individualidades dentro das restrições e limites da modulação e dimensões das partes pré-fabricadas. A adaptabilidade, nesse contexto, era o que mais interessava aos construtores da pré-fabricação seguidores de Gropius nos anos 1950 (SMITHSON e SMITHSON, 2001).

Oshima (2008), ao tratar da pré-fabricação no Japão, ressalta num contexto histórico a flexibilidade das habitações japonesas como um requisito favorável à pré-fabricação, cuja ligação é fundamental. Nas palavras de Gropius, em 1950, seria uma tarefa desafiadora à nova geração de arquitetos japoneses encontrar a relação adequada entre o conceito tradicional flexível e o novo desenvolvimento industrial (OSHIMA, 2008).

Em fins do século XX, para o autor, a arquitetura japonesa atual se vale da pré-fabricação para produzir habitações flexíveis, com o máximo de eficiência, para se acomodar nos mais variados terrenos e se adequar às necessidades dos clientes. Já no século XXI, a pré-fabricação japonesa teve que se adaptar às novas estruturas familiares, sobretudo casas para pessoas sozinhas, solteiras (OSHIMA, 2008).

A tendência atual no Japão, segundo Oshima (2008), é a arquitetura "*prêt-à-porter*", uma estratégia de pesquisar e desenvolver tipologias consistentes de casas que se ajustam às condições específicas. A pré-fabricação atual trabalha com sistemas abertos de edifícios com inúmeras, infinitas possibilidades além da pré-fabricação anterior em uma "caixa" uniforme, padronizada.

É importante pontuar dois conceitos que permeiam a maior parte da bibliografia utilizada para este artigo: flexibilidade e adaptabilidade. A diferença desses conceitos, no entanto, não fica clara, sendo usado mais ou menos indiscriminadamente entre os autores, sendo mais usada a flexibilidade.

No entanto, para este trabalho entende-se necessária uma diferenciação entre os termos. Será tratada como flexibilidade a polivalência de usos, ou a não atribuição de uma função específica aos cômodos da habitação. A flexibilidade estaria mais relacionada aos diferentes usos de um mesmo espaço a depender das mudanças de uso e de demandas ao longo do dia, da semana, em um curto prazo. Uma aptidão para diferentes atividades ou aplicações, de acordo com o dicionário Aurélio.

Já a adaptabilidade será relacionada à convertibilidade, com a alteração das características espaciais de um cômodo, de uma habitação. Tem a ver com a reconfiguração do espaço para

servir a outro fim, alterando as suas características físicas. Adaptar é amoldar-se, ajustar-se, conformar-se, ambientar-se, conforme o Aurélio.

Portanto, enquanto a flexibilidade diz respeito ao espaço em si, à sua estrutura, de certo modo passiva, a adaptabilidade remete à possibilidade de se ajustar, de se amoldar, é ativo, demanda ação. Tais características foram tratadas nos textos lidos, seja numa perspectiva histórica, seja numa perspectiva de estratégias de projeto, inclusive relacionados à pré-fabricação.

3.5 Estudos de caso: as primeiras casas pré fabricadas

A seguir, será feita uma análise que permitirá comparar as primeiras casas pré-fabricadas, de Walter Gropius e Jean Prouvé, as casas pré-fabricadas brasileiras e as casas pré-fabricadas da atualidade. Para esta análise serão levados em conta alguns quesitos fundamentais deste tipo de construção, como tempo de montagem, possibilidade de customização e a adaptabilidade a vários terrenos e localidades.

3.5.1 A Casa de Cobre, Walter Gropius, 1931

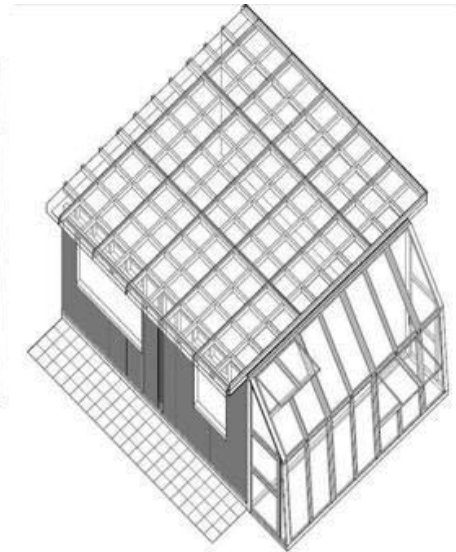
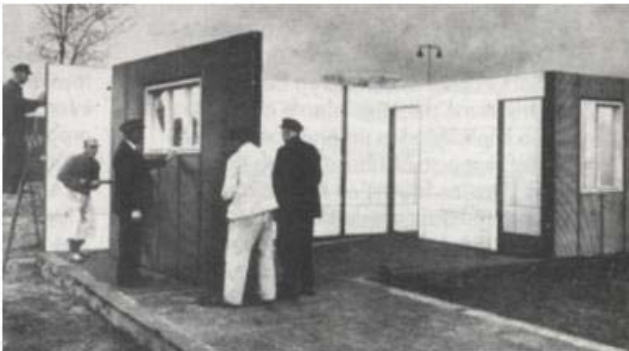
A Casa de Cobre, idealizada por Walter Gropius para a Exposição de Berlin de 1931, encomendada pela empresa Hirsch Kupfer, uma das principais empresas de cobre e latão do país, foi executada com um novo sistema de pré-fabricação que permitia contar com uma casa ampliável e desmontável. Esta casa foi exibida mais tarde na Exposição *Das Wascsende Haus* (a casa ampliável), organizada em 1931 em Berlin, por Martin Wagner.

Gropius implanta este sistema com soluções realmente novas que supõem um grande ponto de reflexão neste momento, e que seriam de vital importância para investigações posteriores. Algumas das vantagens destas casas pré-fabricadas e de fácil montagem são a eliminação da umidade no processo de construção, a leveza das peças, independência das condições atmosféricas para a construção, caráter de montagem, reduzidos custos de manutenção graças à alta qualidade dos materiais que, devido à produção padronizada apresenta também vantagens econômicas e, sobretudo, a rapidez na entrega e na montagem.

O sistema se compõe de uma estrutura em madeira, em que as partes pré-fabricadas se fixam no canteiro de obras, isoladas por meio de lâminas de alumínio. O revestimento exterior é de cobre, enquanto o interior é de placas de fibrocimento. A cobertura se compõe igualmente de uma estrutura de madeira que forma um tabuleiro em que se coloca o isolamento e as placas

de cobre que completam o fechamento. Além disso, as casas contam com uma superfície anexa para utilizar como jardim de inverno, podendo ser utilizada para o cultivo de plantas ou de alimentos, e tem também uma superfície considerável de varanda ou espaço livre externo.

Figura 20: A Casa de Cobre em construção, e desenho isométrico.

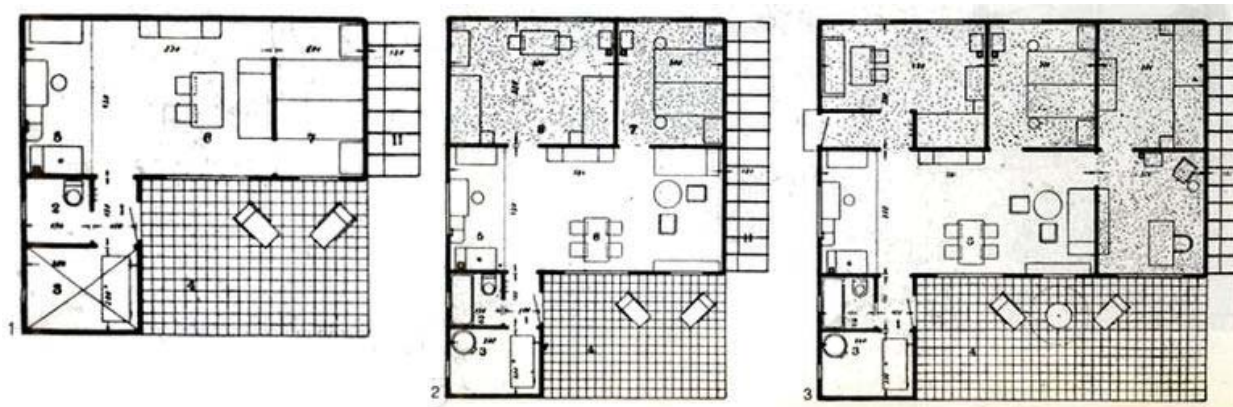


Fonte: <https://proyectos4etsa.wordpress.com/2012/07/06/casa-exposicion-de-berlin-1931-walter-gropius/>

Seguindo uma mesma linha construtiva e estética, e de maneira a oferecer diferentes possibilidades de acordo com as necessidades de cada cliente, Gropius distingue seus três modelos de casa, segundo a área e necessidades desejadas:

- Casa menor: 50m² + 25m² exteriores. Planta do modelo mínimo.
- Casa intermediária: 90m²+35m² exteriores. Mesmo modelo com dois quartos a mais.
- Casa maior: 130m²+50m² exteriores. Mesmo modelo com quatro quartos.

Figura 21: Possibilidades de customização da Casa de Cobre pela adição de módulos.

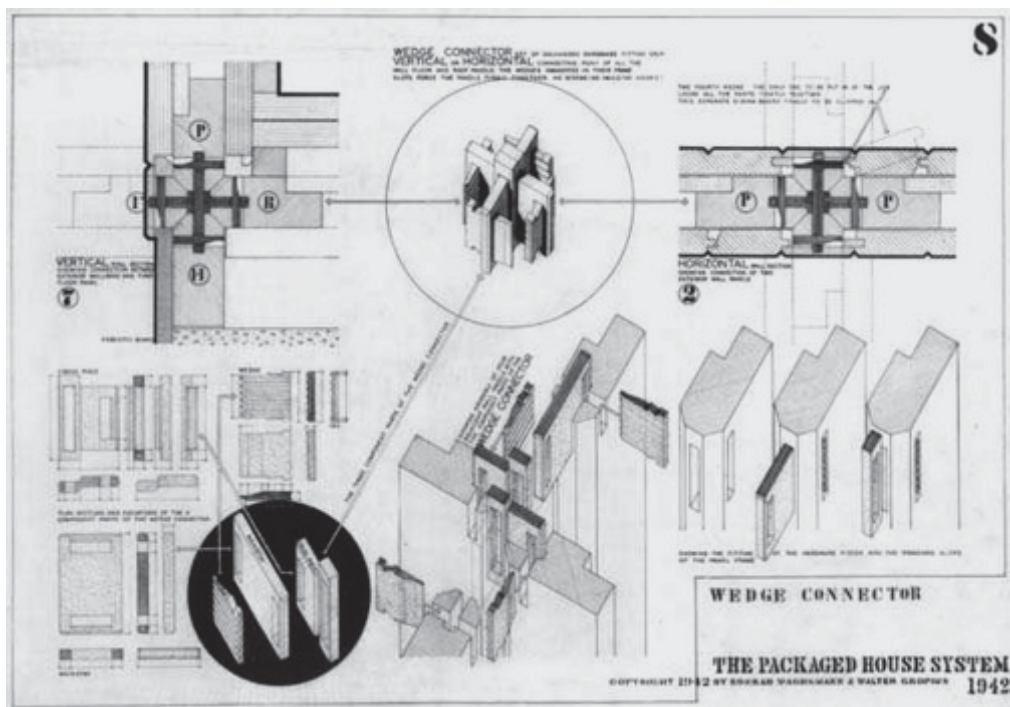


Fonte: <https://proyectos4etsa.wordpress.com/2012/07/06/casa-exposicion-de-berlin-1931-walter-gropius/>

3.5.2 Packaged House, Walter Gropius e Konrad Wachsmann, 1931

Além de representar uma revolução na pré-fabricação, a Packaged House, ou Casa Embalada, de Konrad Wachsmann e Walter Gropius representou o ápice da construção em Wood-frame, que em 1942 já acontecia tanto na Europa quanto nos Estados Unidos. O que é mais relevante é a origem da parceria entre dois arquitetos influentes, cada qual com seus interesses distintos, em participar de um mesmo projeto em parceria. À época, Gropius morava nos Estados Unidos, e lecionava em Harvard, enquanto Wachsmann, seu amigo de longa data, estava passando por dificuldades financeiras e veio pedir auxílio (inclusive de moradia) a Gropius. Em suas conversas, devaneios e discussões tardios madrugada a fora, os dois acabaram por desenvolver a Casa Embalada. Anos mais tarde Gropius chega à conclusão que seu trabalho foi mais de mentor e facilitador, e permite que Wachsmann patenteie o sistema em seu nome em 1942. Wachsmann passa então dias e noites debruçado sobre o projeto que não é apenas de uma casa, mas de toda uma indústria, de um novo um sistema construtivo.

Figura 22: A peça em formato de X que conferiu a originalidade do sistema



Fonte: IMPERIALE, 2012

Figura 23: montagem do protótipo da Packaged House



Fonte: <<http://www.harvardartmuseums.org/art/51954>>

Ele desenvolveu uma série de dez diferentes tipos de painéis dispostos em requadros tridimensionais, que unidos formavam todas as superfícies horizontais e verticais. No entanto, o sistema de painéis não era tão original assim como Gropius havia pensado, mas foi na realidade o elemento de conexão entre os painéis, uma peça em formato de cruz, que provou que o sistema era de fato original. Os conectores comuns tinham formato de "Y" e eram mais frágeis que o novo conector com formato de "X", que com inércia maior, era mais resistente. Enquanto Wachsmann continuava a desenvolver o sistema, Gropius vai atrás de investidores para o que eles chamam de "General Pannel System". Os dois tinham concepções diferentes acerca do potencial no novo sistema. Para Gropius, o progresso tecnológico tinha em sua essência uma força imutável que precisava ser aproveitada pelos humanos para que alcançassem seus objetivos. Gropius, considerado um humanista, via a máquina como uma potencial força desumanizadora sobre a qual o homem tinha controle. Já para Wachsmann, que dizia que "O amanhã é tudo", a percepção da tecnologia como uma força libertadora na arquitetura. O debate da influência e do papel da tecnologia na arquitetura continua até hoje, e foi incorporado na proposta modesta para uma casa pré-fabricada.

À beira da falência, Wachsmann finalmente consegue encontrar investidores, e após muito esforço, constrói um protótipo em Somerville, Massachusetts, já em 1943. Apesar de ser alvo de muitas críticas, a casa acabou por atrair investidores seguros. Finalmente, em 1946, a corporação Celotex de Burbank, Califórnia, comprou a patente e adquiriu uma antiga fábrica de motores de avião para desenvolver o negócio, que seria chamado agora de General Pannel Corporation. Um plano era produzir 8.500 casas por ano, em uma economia crescente que favorecia a busca por habitação do pós-guerra. Infelizmente, a meta não foi alcançada, pois o equipamento da fábrica falhou, afetando a produção e, conseqüentemente, a linha de financiamento. Em 1952 a empresa faliu, e o sonho da Casa Embalada se tornaria apenas mais um esforço que falhou na história das casas pré-fabricadas.

Para Imperiale, (2012), o sistema Package House é um conjunto de peças perfeitamente coordenado que pode ser montado com várias combinações diferentes. O sistema de conexões foi baseado na possibilidade de unir dois, três ou quatro painéis. Todas as superfícies do edifício foram criadas do mesmo tipo de material: paredes internas, paredes externas, piso, cobertura. Deste modo, infinitas configurações poderiam ser criadas usando um mesmo sistema. Um aspecto impressionante deste projeto está nas qualidades abstratas da casa, em sua uniformidade e precisão. A "Casa Embalada" foi a precursora de um novo nível da sofisticação tridimensional.

3.5.3 Casa desmontável 6x6, Jean Prouvé, 1944

Durante a primeira metade do século XX, Jean Prouvé chegou de forma indireta à arquitetura: a produção de móveis e componentes de casas - inovadores e tecnológicos - o levou ao projeto de um edifício e ao refinamento de seus métodos de construção. Os princípios da pré-fabricação, flexibilidade e mobilidade foram usados como resposta de projeto para a necessidade de habitações acessíveis produzidas em massa na França do pós-guerra.

Em 1939, com a Guerra já declarada, Prouvé foi chamado pelo General Dumontier para desenvolver um abrigo para 12 homens que fosse possível construir em poucas horas. Após trabalhar dia e noite, Prouvé apresentou ao general um protótipo de sua primeira casa desmontável. No teste de montagem dos abrigos o tempo de montagem era de apenas três horas. O exército francês encomendou 275 destas casas, mas com a invasão alemã, a produção não foi levada a cabo.

Após a libertação da França, o escritório de Jean Prouvé recebeu uma encomenda do ministro da Reconstrução e Planejamento Urbano, Raoul Dautry, para criar 800 instalações de emergência para as vítimas da guerra. Posteriormente chamadas de "*maisons a portiques*", as casas desmontáveis apresentavam um desenvolvimento daqueles primeiros abrigos, e caracterizavam-se igualmente pela montagem rápida e fácil. As exigências deste tipo de edificação eram transporte por caminhão (as peças não podiam exceder os 4m de comprimento); possibilidade de montagem com poucos meios humanos – o ideal seria dois trabalhadores treinados para tal; juntas e uniões não poderiam estar sob tensão devido às distorções térmicas; as fachadas tinham que ser constituídas de elementos substituíveis e nenhuma peça do edifício podia pesar mais de cem quilos.

Segundo Peters (2007), o princípio aplicado nesta casa já havia sido desenvolvido por Prouvé durante a guerra, em conjunto com Charlotte Perriand e Pierre Jeanneret, para o fabricante de alumínio *Société Centrale des Alliages Légers* (S.C.A.L.).

Em 1944-1945, após a incorporação minuciosa dos métodos de construção da habitação familiar de Prouvé, uma série de casas desmontáveis 8x8 foram produzidas, com melhorias para maior conforto. A estrutura de suporte é construída inteiramente por chapas de aço dobradas, assim como as vigas do piso e do telhado. O uso desse modelo para a reconstrução do país levou à produção da casa Métropole, em 1949.

Figura 24: A Casa 6x6m



Fonte: <http://www.patrickseguin.com/fr/designers/jean-prouve-architecte/inventaire-maison-jean-prouve/maison-demontable-6x6-1944/>

Figura 25: O pilar em formato de compasso, estrutura principal da casa 8x8m



Fonte: <http://www.patrickseguin.com/en/designers/architect-jean-prouve/available-houses-jean-prouve/8x8-demountable-house-1945/>

Apenas duas Casas Desmontáveis 8x8 são atualmente conhecidas: a utilizada por Jean Prouvé como seu escritório - agora um monumento histórico - e a que foi apresentada pela Galerie Patrick Seguin na exposição Design Miami 2013.

O galerista francês Patrick Seguin possui 20 casas desmontáveis modelo 6x6m. Recentemente, Seguin e sua esposa convidaram o inglês Richard Rogers para adaptar uma das casas para uso de veraneio. A nova versão manteve a integridade dos espaços e estrutura originais, e incluiu dois anexos para banheiro e cozinha, cujos módulos contam com toda a atualização necessária no que se refere à tecnologia atual das construções: sistemas de reuso da água cinza e água da chuva, banheiro ecológico e módulos de serviço acoplados que fornecem aquecimento solar da água e energia elétrica solar.

“Em uma época em que a construção continua em ritmo avassalador, muitas vezes de forma inconsequente, os projetos de Prouvé servem para lembrar que boas ideias embasadas em processos e sistemas inteligentes e simples se provam adaptáveis e, portanto, atemporais”. (BELCHIOR, Camila. Revista Bamboo, nº49, julho 2015, pp. 38)

3.6 Estudos de caso: as casas pré fabricadas no Brasil

3.6.1 Breve histórico da pré fabricação residencial no Brasil

Para Vasconcelos (2002), a primeira notícia que se tem de uma obra grande com utilização de elementos pré-moldados no Brasil foi o Hipódromo da Gávea, no rio de Janeiro. A firma construtora dinamarquesa com sucursal no Brasil chamada Christiani Nielsen executou em 1926 a obra completa do hipódromo, com diversas aplicações de elementos pré-fabricados como estacas de fundações e as cercas no perímetro da área reservada ao hipódromo.

A partir da década de 1960, com a construção de Brasília, os elementos pré-fabricados, principalmente estruturais, passam a ser largamente utilizados, por conferirem rapidez e agilidade nas obras da capital. As primeiras experiências do arquiteto Lelé (João Filgueiras Lima) em pré-fabricação foram no final da década de 50 (LIMA, 2014). A necessidade de fazer rapidamente alojamentos para os mais de dois mil operários que chegavam de todo o Brasil para a construção da nova capital do país fez com que as construtoras escolhessem a solução de pré-fabricação em madeira para acelerar o processo. A oportunidade da insutrialização ganhar força apareceu em 1962 quando Darcy Ribeiro, então reitor da Universidade de Brasília,

convidou Lelé para trabalhar no Centro de Planejamento (Ceplan) da UnB, onde seria criado um grande centro de construção industrializada (TRIGO, 2009). Os primeiros projetos com pré-fabricados de concreto foram os edifícios residenciais para professores e os galpões de serviços Gerais (SGs) da UnB. Lelé participou também, junto com Oscar Niemeyer, no projeto e construção do Instituto Central de Ciências da Universidade de Brasília. A fábrica planejada pelo Ceplan para a construção de outros edifícios do Campus acaba por não se concretizar por conta do Golpe Militar. No entanto, ao longo de toda a sua trajetória profissional, Lelé buscou o aprimoramento do seu trabalho, avançando a cada recomeço, no processo de industrialização da construção do país (TRIGO, 2009). Sua obra é conhecida pelo uso de elementos pré-fabricados aliados ao uso da ventilação e iluminação natural.

No mercado de residências unifamiliares, a pré-fabricação no Brasil teve algumas empresas no ramo. A mais conhecida delas, a Casema, recentemente encerrou suas atividades e deixou de produzir seus famosos kits de casa de madeira. A empresa foi por muitos anos referência do mercado de casas pré-fabricadas em madeira no Brasil.

Com a criação do Banco Nacional da Habitação (BNH), em 1966, o governo brasileiro adotou uma política equivocada de desestímulo à industrialização, na expectativa de incentivar o emprego maciço de mão-de-obra não qualificada em canteiro. Este fato acaba por atrasar o desenvolvimento da indústria de pré fabricados no país.

Uma pesquisa realizada por Albuquerque et al (2005) mostra um levantamento dos sistemas estruturais pré-moldados utilizados no Brasil com participação dos fabricantes e projetistas de estruturas, e com utilização do banco de dados da Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto (ABCIC) chegou à conclusão que 70% em média, das obras pré-moldadas não são originalmente concebidas para a utilização deste tipo de sistema, mas adaptadas de uma estrutura concebida para ser executada em concreto moldado in loco.

Recentemente, de maneira oposta ao ocorrido após a criação do BNH, a pré-fabricação residencial vem ganhando força novamente no país com o programa Minha Casa Minha Vida, em que empresas construtoras utilizam a pré-fabricação como um meio rápido de entregar um grande número de casas. O problema atual é que nem sempre os materiais utilizados para a construção destas casas são adequados ao clima, e acabam prejudicando o conforto térmico dos usuários.

É inegável que o sistema pré-fabricado tem avançado muito no Brasil, havendo porém muito terreno a recorrer. Os avanços já obtidos refletem, de certa forma, seu potencial. Hoje, nota-

se que o país poderia obter ainda mais avanços na área do pré-fabricado, caso houvesse uma política dirigida para as pesquisas e para o aprimoramento das técnicas existentes. Os materiais apresentados a seguir são os mais recorrentes na construção de casas unifamiliares pré-fabricadas no Brasil.

3.6.2 Materiais e sistemas construtivos utilizados na pré fabricação residencial no Brasil

A seguir serão descritos alguns dos materiais pré fabricados mais utilizados na vedação de paredes e coberturas de casas pré fabricadas atualmente no Brasil. As propriedades térmicas dos materiais testados estão descritas mais a frente, no capítulo de metodologia das simulações termo energéticas.

3.6.2.1 Laminado de madeira cruzada ou Cross Laminated Timber (CLT)

O painel composto por laminado de madeira cruzada ou CLT (Cross laminated Timber) consiste na sobreposição de lâminas de madeira maciça coladas em sentidos alternados e opostos, entremeados de adesivo natural e à prova d'água, e submetidas a grande pressão. São compostos de um número ímpar de camadas (3, 5 ou 7), com espessura variando entre 57 e 250mm. A laminação cruzada melhora as propriedades estruturais dos painéis através da distribuição de força ao longo das fibras de madeira em ambos os sentidos, o que praticamente elimina qualquer retração significativa ou deformação dos painéis. Os painéis são autoportantes, podendo suportar grandes cargas e possibilita a construção de edifícios em vários pavimentos. As grandes dimensões dos painéis, de até 12m por 3m de largura, reduzem o tempo de montagem e conseqüentemente os custos da construção. O CLT pode ser usado portanto para painéis de lajes e paredes, ou pode ser combinado a outros materiais. Os encaixes entre vários painéis são feitos através de juntas tipo "fingerjoints".

Considerando a expressiva redução de resíduos em canteiro devido ao fato de que os painéis são encomendados com a exata dimensão em que serão utilizados, e à menor utilização de água no processo de produção, este sistema é menos poluente do que a grande maioria dos materiais de construção. Além disso, a madeira é o único material de construção estrutural inteiramente renovável, e apresenta baixo consumo energético para sua produção. No Brasil, a empresa nacional Crosslam produz e fabrica o CLT.

Figura 26: Painel de laminado de madeira cruzada ou CLT



Fonte: Crosslam, 2016.

Figura 27: Montagem de painéis CLT



Fonte: Crosslam, 2016.

Figura 28: Junções de painéis através do sistema "finger joints"



Fonte: Crosslam, 2016.

3.6.2.2 Isotelha trapezoidal EPS

Composta por chapas de aço pré-pintado e núcleo isolante em EPS (poliestireno). A largura útil de cada telha é de 1000mm, e as espessuras variam entre 30, 50, e 100mm. Esta telha é considerada por seu fabricante como um produto mais econômico, pois sua estrutura trapezoidal dá mais resistência mecânica ao painel, permitindo maior espaçamento entre terças e resultando em economia na estrutura do telhado. Disponível nas cores branco e cinza, fabricada pela Isoeste.

Figura 29: Isotelha trapezoidal EPS



Fonte: Isoeste, 2016.

3.6.2.3 Isotelha trapezoidal PUR

Composta por chapas de aço pré-pintado ou aço galvalume e núcleo isolante em PUR (poliuretano). A largura útil de cada telha é de 1000mm, e as espessuras variam entre 20, 30, 50, 70 e 100mm. Esta telha é considerada por seu fabricante como um produto ecológico por sua cadeia de produção estar livre de HCFC (hidroclorofluorcarbonos), tipos de gases nocivos à Camada de Ozônio. O fabricante é a Isoeste.

Figura 30: Isotelha trapezoidal PUR

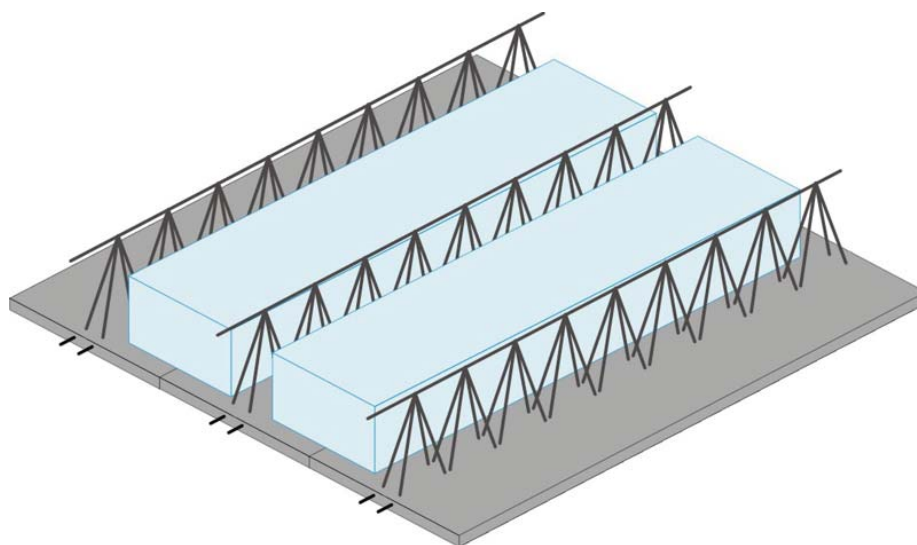


Fonte: Isoeste, 2016.

3.6.2.4 Laje Painel Trelaçada

A Laje painel trelaçada pode ser unidirecional ou bidirecional. São painéis de 25cm de largura com estrutura trelaçada que são preenchidos por placas de EPS (poliestireno), e concreto armado. As alturas variam entre 12, 14 e 16cm, e o que varia é a espessura da placa de EPS. Por serem pré-fabricados, estes painéis dispensam o uso de escoras ou formas na construção. Fabricante: Concreviga.

Figura 31: Laje painel trelaçada



Fonte: http://www.prefatto.com.br/pre_lajes_painel.php

3.6.2.5 Telhado Verde – Sistema laminar médio

O Sistema Laminar Médio é uma evolução do telhado verde tradicional por ser um sistema hidropônico que utiliza a água da chuva ou água tratada da própria edificação. Funciona como um piso elevado, sobre o qual temos a vegetação, e sob o qual temos um leito de água. Pode ser usado para o tratamento de efluentes do edifício para reutilização, e faz com que a laje se torne uma cisterna. A irrigação das plantas é feita subsuperficialmente, não havendo contato da água com o ar, e evitando assim a proliferação de mosquitos e outros insetos. A altura reduzida do sistema (7cm) permite que seja instalado em qualquer superfície plana. O fabricante é a Ecotelhado.

Figura 32: Sistema laminar médio Ecotelhado



Fonte: <https://ecotelhado.com/portfolio/ecotelhado-telhado-verde/sistema-laminar-medio/>

3.6.2.6 Painel de fachada LDR

Os painéis LDR são corta fogo e proporcionam isolamento térmico e acústico. Composto por duas chapas de aço pré-pintado e núcleo em lã de rocha, os painéis LDR tem largura útil de 1150mm, e espessuras que variam entre 50, 100 e 200mm. Este painel só está disponível na indústria na cor branca. O fabricante é a Isoeste.

Figura 33: Painel de fachada LDR

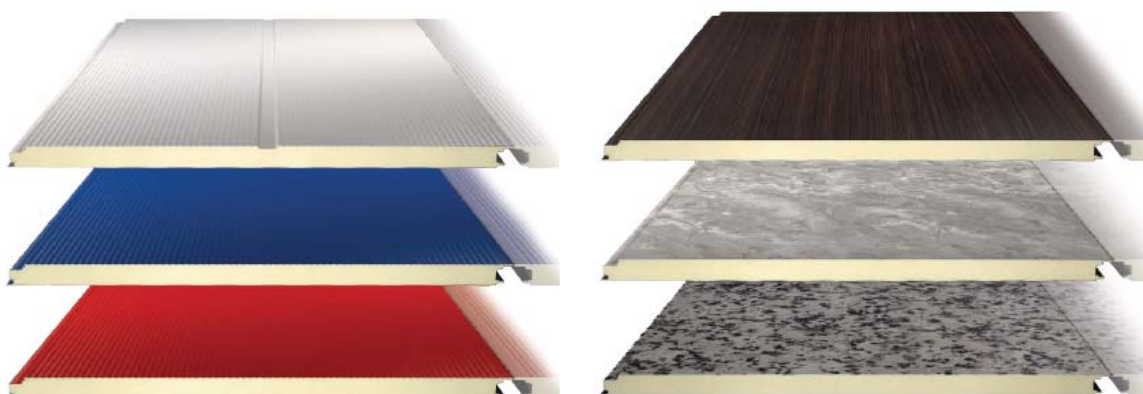


Fonte: Isoeste, 2016.

3.6.2.7 Painéis Isofachada PUR

Constituídos de núcleos em PUR (poliuretano) e revestidos por chapas de aço pré-pintado, os painéis isofachada siliconizados possuem um sistema de encaixe que torna praticamente invisíveis as junções entre eles. As chapas de aço são pré-pintadas com tintas especiais (*cool colors*) elaboradas com pigmentos frios que refletem o calor mesmo quando se trata de cores fortes. No entanto, o catálogo técnico do material não fornece os dados de absorvância das diferentes cores oferecidas. Os painéis são encontrados também na versão texturizada. A largura útil dos painéis é de 1100mm, e as espessuras variam entre 50, 70 e 100mm. O fabricante é a Isoeste.

Figura 34: Painel Isofachada PUR



Fonte: Isoeste, 2016.

3.6.2.8 Sistema Auto-portante de construção a seco

O sistema auto portante de construção a seco (*Light Steel Frame*) é um sistema construtivo de concepção racional cuja característica principal é ser constituído por estrutura de perfis leves de aço galvanizado (Freitas e Crasto, 2006). Os perfis, ou montantes, são separados entre 400 e 600mm, e os fechamentos podem ser feitos por vários materiais. Os fechamentos mais comuns são as placas cimentícias ou placas de OSB (orientes strand board) externamente, e placas de gesso acartonado internamente. O interstício entre as placas pode ser preenchido com material isolante, de acordo com a necessidade do projeto.

Figura 35: Vedações em placas cimentícias e placas de gesso acartonado



Fonte: http://rocherdrywall.com.br/old/steel_frame.php

3.6.2.9 Sistema Monolite

O sistema Monolite é um sistema construtivo anti-sísmico, isolante, termo-acústico com o qual se pode realizar construções de vários pavimentos e tipologias arquitetônicas (Souza 2009). É composto por placas de EPS (poliestireno expandido) revestidas por argamassa armada em suas duas faces, cuja armadura é fixada nos arranques da fundação. As espessuras variam entre de 55 a 250mm.

Figura 36: Vedação em placas de EPS e argamassa armada



Fonte: <http://www.monolite.com.br/home>

3.6.2.10 Painel Thermopore

O painel estrutural Thermopore é formado por placas cimentícias e núcleo preenchido em concreto EPS (poliestireno). Devido à sua composição, o painel Thermopore é leve, e seus encaixes macho-fêmea ajudam a estabilizar e vedar as juntas. Seu fabricante considera um material que proporciona economia por reduzir as cargas nas fundações, vigas e pilares. Os painéis tem 610x2440mm, e as espessuras variam entre 50, 75, 100, 125 e 150mm. O fabricante é a Ecopore.

Figura 37: Painel de placas cimentícias e Thermopore



Fonte: <http://www.ecopore.com.br/aplicacoes/painel-de-concreto-celular/>

3.6.2.11 Painel misto de concreto armado e tijolos cerâmicos

Sistema construtivo de painéis estruturais pré-moldados mistos compostos por blocos cerâmicos de vedação com oito furos quadrados e nervuras de concreto armado, destinado à construção de casas térreas isoladas. Os blocos cerâmicos têm largura de 9 cm e são revestidos com argamassa nas duas faces com 1 cm de espessura.

Figura 38: Painel de tijolos cerâmicos



Fonte: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/191/artigo286987-1.aspx>

3.7 Estudos de caso: as casas pré fabricadas da atualidade

Atualmente, o mercado das casas pré-fabricadas ainda é muito forte nos Estados Unidos, e de maneira geral tem alguns expoentes em países em desenvolvimento, aonde o déficit habitacional ainda é expressivo. Apesar disso, a procura pelas casas pré-fabricadas nestes países vem por consumidores de classe média, que buscam construir suas casas próprias, casas de fim de semana ou mesmo casas de campo através de um sistema veloz, limpo e eficiente

de construção. As casas pré-fabricadas atuais são fabricadas em indústrias como eram antes; são transportadas até o local em que serão construídas; e finalmente são montadas in loco e finalizadas. Até aí, não se nota tanta evolução assim. Talvez a diferença esteja na customização da casa, ou seja, a escolha do modelo, tipo de planta baixa e suas diferentes disposições de ambientes, e inclusive a escolha dos acabamentos internos e externos. Outro aspecto interessante que apresenta certa evolução é a preocupação que estas novas tecnologias construtivas apresentam em relação à sustentabilidade no que diz respeito à eficiência energética das casas, tratamento de água e resíduos, dentre outros sistemas que estão integrados às casas.

Estão listados a seguir alguns exemplos de casas pré-fabricadas do mercado atual. O destaque é para a Archi+, apontada pela revista Architectural Digest em março deste ano como sendo a última novidade em casas pré-fabricadas. A Archi+ (Casa Carbono Positivo) da empresa australiana Archiblox, se destaca por suas dimensões compactas de conceito impactante, que marca um avanço considerável na tecnologia da construção residencial a favor da diminuição dos efeitos geradores da mudança climática mundial. Segundo a empresa Archiblox, a Archi+ é “a primeira casa carbono positivo pré-fabricada do mundo”, e foi projetada para produzir mais energia do que consome.

3.7.1 Blu Homes, EUA - Bill Haney e Maura Mccarthy (2008)

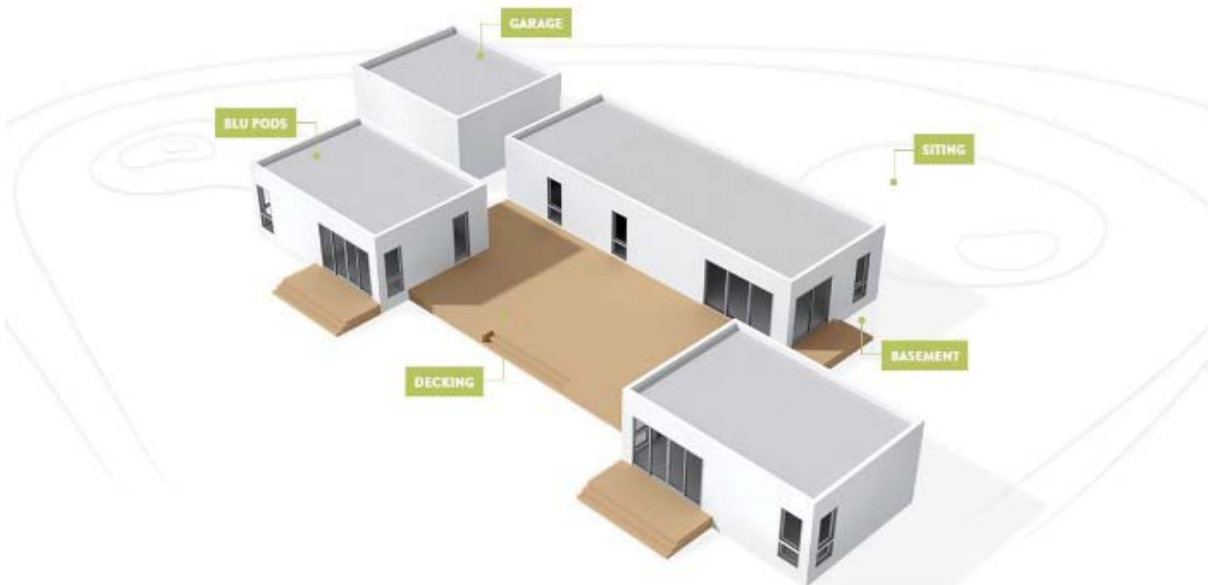
Blu Homes é atualmente o fornecedor líder de casas pré-fabricadas de alto padrão na América do Norte. Projetadas na Califórnia e construídas na metade do tempo de casas convencionais, as casas Blu apresentam pé-direito alto, grandes esquadrias que permitem a ventilação cruzada e iluminação natural, acabamentos de qualidade, e tecnologias integradas de alto desempenho. A tecnologia da informação da Blu permite que os clientes criem suas casas on-line em 3D, e recebam o orçamento da construção. Profissionais qualificados e tecnologia exclusiva de estrutura metálica permitem construir casas de em aço reforçado, construir os módulos na fábrica e fazer apenas a montagem e conexões no canteiro. A empresa foi fundada por dois empresários voltados para a área da tecnologia e sustentabilidade. Neste sentido, as casas apresentam níveis de consumo energético 50% menor do que o de casas convencionais, além de contar com tecnologias de produção local de energia e estratégias passivas para a redução do consumo energético. O fato de as casas serem industrializadas também diminui o impacto ambiental em relação às construções convencionais.

Figura 39: Vista externa da Blu home modelo Origin



Fonte: <https://www.bluhomes.com/origin>

Figura 40: Esquema de possibilidades de composição de módulos Blu Home modelo Origin



Fonte: <https://www.bluhomes.com/origin>

O sistema de montagem é muito interessante, pois as peças são embaladas para caber em um caminhão, e ao chegar no canteiro de obras elas se “desdobram”, permitindo que seja feito apenas o acabamento interno. Essa facilidade de montagem deve-se à tecnologia desenvolvida especialmente para tal, mas também à Packaged House de Gropius, que já nos primórdios da pré-fabricação de casas possuía esse sistema de piso e paredes articulados para facilitar transporte e montagem. Em relação ao sistema construtivo, assemelha-se também às casas de Prouvé, que eram montadas com apenas duas pessoas. As Blu Homes são maiores, e as equipes de montagem são grandes para garantir que a construção se dê no menor tempo possível, mas o princípio da sequência de montagem e encaixes é o mesmo.

Outro aspecto interessante abordado pela Blu Homes no sentido da customização, é a composição de vários elementos externos à casa em si, como garagem, porão, calçamentos externos, dentre outros.

3.7.2 Mima House, Portugal - Mário Sousa e Marta Brandão (2011)

A Mima House é uma residência requintada fabricada no norte de Portugal. Ela é única por sua capacidade de ser reconfigurado pelos proprietários à época do projeto, e também após sua construção. Isso é possível devido ao fato que as paredes interiores consistem de painéis leves que podem ser facilmente realocados ou removidos por duas pessoas. Vários anos foram investidos pelos arquitetos fundadores para refinar o conceito da casa, a fim de chegar a um produto final que seria rápido de fabricar, fácil de montar, de boa qualidade e preços acessíveis.

A casa tem a planta quadrada e as quatro fachadas praticamente idênticas. Os pilares nos quatro cantos suportam a cobertura, permitindo que as aberturas laterais sejam todas envidraçadas. A área interna de 36m² é dividida em um grid de 1,5m que consiste em trilhos no piso e no forro. É nestes trilhos que as divisórias podem ser alocadas conforme a necessidade do usuário. Os painéis estão disponíveis em diferentes cores e tipos de acabamento, podendo contribuir também para a decoração interna dos ambientes da casa. Os mesmos painéis podem ser colocados em frente às janelas, permitindo uma maior privacidade ou proteção solar aonde seja necessário. Apesar da padronização da construção, estes pequenos elementos tornam as casas customizáveis de modo que dificilmente existirão duas casas idênticas.

Figura 41: Vista externa da Mima House



Fonte: <http://www.mimahousing.com/mima-house/>

Figura 42: Divisórias internas móveis da Mima House



Fonte: <http://www.mimahousing.com/process-1/#>

Aqui também é possível contar com um software online que permite que os clientes façam parte do processo de projeto da casa. É um tipo de arquiteto virtual que dá direcionamentos acerca das possibilidades de customização da MIMA House como: locação no terreno, tamanho, tipologia, layout, divisórias internas, aberturas, acabamentos. Depois de testar seu projeto, o consumidor recebe um arquivo pdf com os desenhos e imagens renderizadas de como ficou a casa que ele escolheu.

No caso da Mima House, a comparação às casas desmontáveis de Prouvé se dá principalmente pelo formato e dimensionamento. Podemos comparar também o tipo de planta, sem muitas divisões internas, e espaços predominantemente integrados. Apesar de ser uma casa pré-fabricada, neste exemplo a montagem e desmontagem aparentemente não são o forte do projeto arquitetônico, voltado muito mais para o lado estético da casa, e também da flexibilidade interna de posicionamento de divisórias. Em relação à Casa de Cobre, a Mima House tem essencialmente planta quadrada de 6x6m, mas por apresentar planta modular, pode facilmente ser incorporada por outros módulos e oferecer a tão buscada customização e diversidade de possibilidades de layout.

3.7.3 Archi+

A Archi+ (Casa Carbono Positivo) da empresa australiana Archiblox, se destaca por suas dimensões compactas de conceito impactante, que marca um avanço considerável na tecnologia da construção residencial a favor da diminuição dos efeitos geradores da mudança climática mundial.

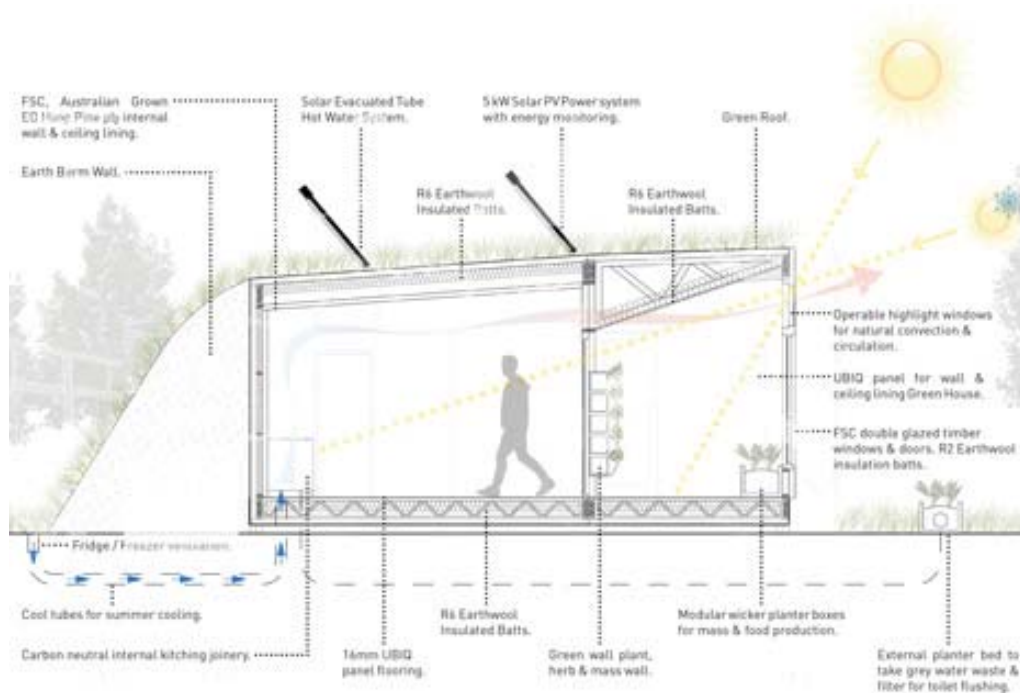
Uma casa Carbono Positivo é capaz de reduzir as emissões de carbono geradas pela fabricação de seus materiais, e também pela geração de energia elétrica – quando se trata de usinas termelétricas por exemplo. Esta casa é capaz de produzir mais energia do que ela consome, o que significa que o excesso de energia elétrica produzida volta para a rede elétrica e pode ser consumida por outras edificações. A casa da Archiblox consegue atingir este resultado através da implantação de vários sistemas e técnicas passivas energeticamente eficientes incorporadas ao seu projeto, como resfriamento pelo piso e cobertura vegetal, que aumenta o isolamento térmico e conseqüentemente reduz o ganho de calor interno.

Figura 43: Vista externa da Archi+ na Civil Square, em Melbourne



Fonte: <http://www.dezeen.com/2015/02/22/prefabricated-house-melbourne-city-square-archiblox-carbon-positive-house/>

Figura 44: Corte esquemático da Archi+



Fonte: <https://www.archiblox.com.au>

Em uma publicação sobre a Archi+, a Green Magazine afirma que esta casa emitirá 1.016 toneladas de carbono a menos do que casas convencionais durante sua vida útil, e isso equivale a tirar 267 carros de circulação, ou a plantar 6095 árvores, ou a retirar o volume equivalente a 31,000,000 de balões contendo CO₂ da atmosfera. Por conta da pré-fabricação, a construção desta casa leva de 12 a 18 semanas, reduzindo custos, e reduzindo o desperdício de materiais de construção – que remetem diretamente à redução do consumo de recursos naturais. Um estudo de ciclo de vida dos materiais embasou o projeto da casa desde o princípio, em que foi realizado um cálculo das emissões de carbono provindas da fabricação dos materiais, transporte, manutenção e operação – incluindo fundações, pisos, paredes, cobertura, acabamentos internos e externos, e equipamentos básicos.

A Archiblox é especializada em casas pré-fabricadas e se dedicou a construir “casas saudáveis” sem prejuízos estéticos ao seu produto final. Esta casa por exemplo, conta com esquadrias envidraçadas de piso a teto, e internamente é revestida por painéis de madeira que conferem aconchego e beleza aos ambientes. O espaço interno compreende um dormitório, um banheiro, uma cozinha integrada à sala de estar, lavanderia e uma varanda. Um protótipo da casa foi construído para divulgação e visitação em fevereiro deste ano em uma das principais praças de Melbourne.

A casa térrea possui uma varanda que ocupa toda a sua extensão, e é o espaço de transição entre os espaços exteriores e interiores. Projetado para ter orientação Norte, a varanda cria um colchão de ar que ajudará a isolar o interior da casa durante os meses mais frios, e também a proteger da insolação no verão. Na parte posterior deste espaço, uma parede verde é coberta por vasos em que os moradores podem usar como horta, ou simplesmente como decoração. A vegetação está presente também na cobertura, oferecendo grande contribuição para o isolamento térmico. Além disso, o projeto conta com um artifício que permite a ventilação natural cruzada através de tubulação que traz o ar fresco do exterior para o interior da casa pelo piso. Os espaços de convívio foram organizados de maneira a serem o mais compacto possível, integrando sala de estar, sala de jantar e cozinha. As dimensões da casa padrão (1 dormitório) são de 8,8x7,7m, sendo que dos 68m² aproximadamente um terço corresponde à varanda – que acaba fazendo parte da área social da casa. Existe a opção com 2 dormitórios (90m²), 2 dormitórios e escritório (95m²) e 2 dormitórios, suíte e escritório (117m²).

Figura 45: Possibilidades de tamanho da Archi +



Fonte: <https://www.archiblox.com.au>

A casa foi projetada para usar a energia solar através de uma série de painéis fotovoltaicos instalados na cobertura. O reuso de água da chuva e águas cinzas também fazem parte do produto, ajudando a reduzir o consumo de água. Não há condicionamento artificial de ar na casa; o condicionamento do ar é feito através da ventilação natural, e através de resfriamento geotérmico, que traz a temperatura do subsolo para dentro da casa. São gerados 5kW de energia elétrica pelos painéis solares da cobertura

O custo da Archi+ é de aproximadamente US\$ 187.687,00 para o modelo de 3 quartos e dois banheiros, de aproximadamente 120m². O custo inicial é aproximadamente o mesmo de uma

casa pré-fabricada padrão americana, apesar de ser uma casa bem menor. No entanto, a economia de energia é significativa, e ao longo dos anos, o investimento acaba se pagando.

3.7.4 Connect Homes

Em meados de 2012 Jared Levy e Gordon Stott lançaram uma empresa californiana que tinha como objetivo resolver a questão endêmica da indústria de casas pré-fabricadas: o preço (FURUTO, 2012). Eles já tinham experiência em projetar casas pré-fabricadas contemporâneas e sustentáveis, mas sua tecnologia patenteada que permite que 95% da casa seja produzida dentro de uma indústria, e em seguida entregue como contêineres através de trens, navios ou caminhões, fez com que o valor da casa finalizada ficasse mais baixo que o praticado pela concorrência.

“Nosso objetivo era prover aos consumidores a alta qualidade de casas que eles desejavam a um preço que eles pudessem pagar”, diz Jared Levy em sua entrevista a Furuto (2012). Para Levy, a ineficiência dos sistemas pré-fabricados (ao menos nos Estados Unidos), deve-se ao fato de que a indústria não é capaz de entregar ao consumidor um produto de qualidade superior e menos caro que as construções convencionais. Todos os modelos Connect:Homes são feitos para serem facilmente transportados, e seus módulos dimensionados para que o transporte possa ser intermodal. Deste modo a empresa é a primeira a entregar suas casas não apenas por caminhões, mas também por vias férreas e navios, permitindo a exportação das casas.

O fato de as casas serem 90% montadas dentro de uma fábrica (as demais fábricas conseguem completar apenas 55% da produção antes de ir para o canteiro), reduz a quantidade de tempo dispendida na execução de instalações e acabamentos no canteiro, e os custos embutidos associados à construção convencional acabam por ser eliminados da equação.

Para este estudo de caso, utilizaremos o modelo Connect:5. Esta opção oferece fluxo espacial em volta da cozinha, posicionada como elemento centralizador da casa, e planta livre. Com número de quartos flexível, esta casa se adapta às necessidades específicas de cada consumidor.

Dentro da página de customização do site é possível “ligar ou desligar” as opções de incluir cômodos a mais, permitindo a visualização imediata do impacto que é causado em planta. Para este modelo é possível acrescentar um deck, hall de entrada, despensa de alimentos, um

quarto extra e garagem para dois carros. Mas a depender da opção selecionada, as outras são desativadas (por exemplo, é preciso decidir entre despensa e quarto extra).

Figura 46: Connect:5 – Vista externa e planta baixa, sem opcionais.



Fonte: <http://connect-homes.com/dev/connect-5-2/>

Figura 47: Connect:5 – Vista externa e planta baixa, com opcionais.



Fonte: <http://connect-homes.com/dev/connect-5-2/>

3.7.5 Ideabox

A empresa norte americana Ideabox oferece opções de casas que são facilmente customizáveis, e os proprietários participam do processo do início ao fim. No entanto, apesar de muitas possibilidades de escolha, os modelos limitam-se àqueles oferecidos no site.

O fundador da empresa, Jim Russel, afirma em entrevista à revista digital Bamboo (2015) que procura oferecer aos consumidores opções que se encaixem em seu modo de vida, e também em suas expectativas financeiras. Para ele, a Ideabox oferece opções para quem quer ter uma casa economicamente acessível, com uma pegada de carbono pequena, mas sem sacrificar a qualidade da construção ou o design. Deste modo, a principal característica das casas é relacionada ao bom projeto, não à quantidade de metros quadrados construídos.

Figura 48: Modelo Confluence em duas versões customizadas.



Fonte: <http://www.ideabox.us/confluence/>

O exterior de cada Ideabox vem com telhas metálicas na cobertura, paredes externas revestidas em galvalume e fibrocimento, e janelas cujos vidros são de baixa emissividade de calor. Os acabamentos internos incluem piso em madeira, bambu ou mármore, e opções de materiais como corian ou silestone para bancadas. A casa já vem com infraestrutura preparada para equipamentos digitais sem fio. Há ainda uma opção de pacote que inclui eletrodomésticos certificados com o selo Energy Star tais como fornos, máquinas lava-louças e lava-roupas, geladeiras, e até mesmo adega para vinhos.

As casas são transportadas semi construídas, em um único volume até o terreno, podendo ser inseridas diretamente sobre as fundações (radier ou estacas). O tempo necessário para completar instalações e deixar a casa pronta para morar é de dois dias.

Figura 49: Variações do Modelo Confluence.



Fonte: <http://www.ideabox.us/confluence/>

A Ideabox oferece em seu website seis diferentes opções de projeto, com variações de área construída e preços. As opções vão de lofts totalmente integrados, a casas de vários cômodos. Há até um modelo que pode ser transportado e utilizado sem estar conectada à rede elétrica, ou de abastecimento de água e esgoto. Os equipamentos de tratamento de resíduos,

aproveitamento de água e geração de energia podem ser acoplados a qualquer modelo. O modelo Confluence, de aproximadamente 83m² é o mais vendido da empresa, e por isso será utilizado para este estudo de Caso.

O modelo Confluence explora a ideia de uma sala de estar central que serve de distribuição aos demais cômodos da casa, dois quartos e dois banheiros. Existem duas alternativas possíveis ao modelo original, cada uma com duas variações possíveis. É possível aumentar a casa com espaço dedicado apenas à cozinha, que por sua vez apresenta dois possíveis layouts. Nesta opção, chamada de C2+, a área interna passa a ser de 118m². Há ainda a opção de modificar a disposição dos ambientes ou mesmo de acrescentar um terceiro quarto à casa. Na opção C3, a casa passa a ter 157m². Com este modelo temos então 5 opções de planta, volumetria e área construída, além das opções de escolha de materiais de acabamento interno e externo.

3.7.6 P.A.T.H.

A parceria realizada em 2012 entre a empresa Riko, uma das construtoras europeias líderes em construção sustentável pré-fabricada em madeira, e o designer Philippe Starck, nasceu do desejo de desenvolver uma série de casas industrializadas, projetadas para satisfazer as necessidades habitacionais globais. Esta colaboração resultou em P.A.T.H. (*prefabricated accessible technological homes*), e oferece 34 modelos que permitem ao consumidor projetar sua casa desde a área interna até a externa. Podem ser escolhidos vários materiais de acabamento, luminárias, diferentes fachadas e estilos de telhados, resultando em uma casa customizada.

Os principais componentes construtivos estruturais de uma P.A.T.H. – divisórias internas e externas, telhados e forros – são pré-fabricados em indústrias controladas, onde o processo de manufatura é protegido de efeitos do clima. Isto permite que a produção seja realizada o ano inteiro. A casa leva aproximadamente 6 meses para ser entregue pronta ao morador após sua compra.

São oferecidas diversas tipologias que diferem em tamanho, número de quartos, quantidade de andares e disposição dos cômodos. Através do site é possível escolher o modelo, número de quartos e estilo de telhado. Cada estrutura oferece fachadas envidraçadas que permitem abundância de luz natural, mantendo as perdas térmicas a níveis mínimos por conta da qualidade do vidro. As casas P.A.T.H. foram concebidas para integrar tecnologias verdes

inteligentes como painéis fotovoltaicos, bombas de calor, painéis solares para aquecimento da água, turbinas eólicas, e coletores de águas pluviais, tornando a casa ambientalmente correta desde sua produção até o fim de sua vida útil.

Figura 50: Variações do Modelo Térreo – 1 quarto e garagem.



Fonte: <http://www.starckwithriko.com/>

Figura 51: Variações do modelo Térreo – 3 quartos.



Fonte: <http://www.starckwithriko.com/>

Neste caso as opções de customização se restringem a acabamentos, sendo os modelos todos iguais, variando apenas no tamanho, a depender da planta escolhida.

3.8 Considerações finais sobre a revisão de literatura: casas pré fabricadas

As casas pré-fabricadas podem ser vistas como possibilitadoras de técnicas de construções que se aplicam melhor do que as formas convencionais de construção, no que diz respeito aos custos e tempo de execução, em que a repetição e a simplicidade revelam vantagens acima das desvantagens. Ao longo dos anos, o modo de pensar, de vender e de adquirir uma casa pré-fabricada mudou de meio (basicamente do catálogo impresso para o catálogo online), mas mudou muito pouco em sua essência.

De todo modo, os estudos de caso auxiliaram na identificação de algumas características importantes deste tipo de construção. Uma delas diz respeito aos materiais, tanto de estrutura quanto de fechamentos de paredes, cobertura, etc. Devem ser utilizados materiais industrializados, como painéis de gesso acartonado, placas cimentícias, sanduíches de painéis metálicos e material isolante, dentre outros. Para os revestimentos as possibilidades são maiores, principalmente se o objetivo for propor uma gama de possibilidades para propor possíveis customizações aos consumidores.

Outra característica marcante é a questão da modularidade, que em sua essência é o que permite a fabricação e a produção em massa em si, e acaba por oferecer possibilidades de aumento ou redução da casa. A construção modular é interessante também para o fator personalização da casa, uma vez que nem todos os consumidores tem as mesmas necessidades em termos de espaço, número de cômodos, etc.

As dimensões das peças e das partes construídas são também importantes características, visto que as partes devem ser transportadas da indústria até o local final, o terreno, basicamente por caminhões. Logo, as dimensões não devem ultrapassar aquelas do veículo de transporte em largura, e parâmetros de estradas interestaduais em altura, como viadutos e pontes, por exemplo.

Atualmente no Brasil, o conceito de casas pré-fabricadas está mais associado à industrialização de elementos construtivos do que propriamente à edificação como um todo. São oferecidos no mercado kits de peças de madeira, por exemplo, em que o proprietário tem que contratar equipe para a montagem, instalações, acabamentos, enfim, em pouco se diferencia de construções tradicionais a não ser pelos materiais. O mesmo ocorre com a oferta de estruturas em *steel frame*, ou mesmo em *wood frame* (esta última mais comum na região sul do Brasil). O fato é que a própria indústria não oferece opções de casas que chegam ao canteiro

praticamente prontas, como as apresentadas nos estudos de caso. Talvez a fusão entre arquitetos, engenheiros e a indústria ainda não tenha ocorrido da maneira com que já acontece em outros países.

A grande vantagem evolutiva da pré-fabricação está relacionada ao avanço da tecnologia, e às preocupações crescentes com o futuro do planeta. A repetição de arquitetura e sua simplicidade podem tornar-se virtudes quando agem em conjunto com a tecnologia verde. Talvez essa seja a grande evolução das casas pré-fabricadas, que é na verdade a evolução da própria indústria: minimizar o impacto outrora causado pelos seres humanos. Através do uso de técnicas de fabricação mais eficientes para reduzir o desperdício, construindo casas de forma rápida e eficiente, e controlando os custos pode-se permitir a construção em massa de casas no menor tempo possível, e da melhor maneira possível.

É necessária uma mudança de paradigma em relação às casas pré-fabricadas brasileiras, que a exemplo do que ocorre em outros países, não trata mais apenas de construções rápidas, mas de soluções ecologicamente corretas, que conferem conforto térmico a seus usuários e altos níveis de eficiência energética.

4. METODOLOGIA

O presente capítulo apresenta o método proposto para o desenvolvimento da pesquisa. A formulação da presente metodologia foi resultado da revisão bibliográfica, da avaliação dos recursos computacionais disponíveis e da discussão com os colaboradores desta pesquisa. Para atender ao objetivo da pesquisa de listar, com o auxílio das simulações computacionais, quais são as alternativas projetuais e os materiais construtivos que desempenham maiores níveis de conforto térmico e eficiência energética desejados para obtenção de residências ZEB, considerando a cidade de Brasília, o método foi estruturado em sete etapas:

1. Apresentação do projeto de casa pré-fabricada a ser simulado;
2. Caracterização dos materiais de parede e cobertura a serem utilizados como variáveis para as simulações;
3. Descrição dos dados de entrada das simulações térmicas e energéticas da edificação, considerando as 35 diferentes combinações de materiais de parede e cobertura;
4. Simulações de potencial de geração fotovoltaica da edificação;
5. Análise das combinações de materiais de paredes e cobertura por simulação com o método de conforto e aceitabilidade da norma ASHRAE 55 (2013) para ambientes residenciais naturalmente ventilados, através de percentual de horas de conforto no ano;
6. Análise do consumo energético de cada combinação de materiais de parede e cobertura;
7. Análise do potencial de produção de energia elétrica fotovoltaica comparado ao consumo energético da casa, avaliando cada uma das 35 combinações, e verificando quais delas são passíveis de proporcionar balanço energético nulo.

Cada uma das etapas será detalhada a seguir.

4.1 Definição do projeto da casa pré-fabricada a ser simulada

A identificação da área de expansão da DF 140, com projetos de condomínios fechados de alto padrão para as classes média e média alta, que oferecem terrenos de dimensões parecidas, e tem como público alvo famílias com necessidades parecidas, aparenta ser um contexto urbano habitacional propício ao desenvolvimento de casas ZEB pré-fabricadas.

Para este trabalho portanto, foi desenvolvido um projeto de casa pré-fabricada. Este projeto teve como base os estudos de caso apresentados em capítulos anteriores, e tem reflexos que conectam a pré-fabricação e a adaptabilidade da residência. Para que seja possível fixar algumas variáveis a serem utilizadas nas simulações, serão definidas algumas premissas de projeto. Estas premissas consideram também as estratégias bioclimáticas para a cidade de Brasília previstas na NBR 15220-3 (ABNT, 2005), para que a casa tenha o melhor desempenho térmico possível, e que seja verificada a necessidade de se utilizar um sistema de climatização artificial ou não. O uso deste sistema impactará diretamente no consumo energético da residência, por isso é um ponto importante a se considerar.

A maior parte da energia consumida em residências pode ser reduzida através da redução de uso de chuveiro elétrico, bem como do sistema de iluminação e condicionamento de ar artificiais. Para tal, estratégias de aquecimento solar da água e de resfriamento passivo dos ambientes devem ser adotadas ainda na fase de projeto.

A NBR 15220-3 (ABNT, 2005) também destaca estratégias para as aberturas: sombrear aberturas envidraçadas; possuir área de ventilação entre 15% e 35% da área do piso. Para as paredes: possuir paredes externas com transmitância menor que 2,20; atraso térmico maior que 6,5 horas; e fator solar menor que 3,5. Finalmente a cobertura deve ser leve e isolada, com transmitância igual ou menor a 2,3; atraso térmico de 3,3 horas e fator solar menor que 6,5.

O projeto reflete em muitos aspectos os estudos de caso anteriormente abordados. A possibilidade de adaptar a casa, fazendo-a crescer conforme a necessidade do morador é um diferencial interessante, e desafiador do ponto de vista da autonomia energética. Ao mesmo tempo, a modularidade proposta para o crescimento da casa permite também que os sistemas geradores aumentem de área, fazendo com que mesmo a casa maior continue com possibilidades de crescer equipamentos caso necessário.

A escolha de um projeto em que a edificação é térrea está relacionada também a uma das estratégias para ZEBs (de modo geral), em que a proporção entre a área disponível de cobertura para a instalação de equipamentos geradores de energia seja suficiente ou maior do que a área interna que deve ser abastecida.

O projeto a ser simulado trata-se portanto de uma casa pré-fabricada térrea, pensada a partir da possibilidade de ser expandida conforme a necessidade de seus moradores. A modulação da estrutura e dos elementos construtivos é de 1,2x1,2m.

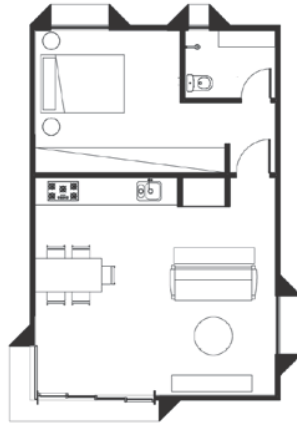
Figura 52: Vista exterior da casa



O módulo inicial tem 6x9m, área de 54m² e abriga uma casa modesta composta por sala, cozinha e lavanderia, banheiro e um dormitório. A este módulo inicial pode ser acoplado um segundo módulo, um pouco menor, de 9x3m (27m²) com mais um quarto, um banheiro e uma varanda. A casa passa então a ter 81m², dois quartos, dos quais um é suíte, sala, cozinha e lavanderia, e varanda. Um terceiro módulo pode ser adicionado à casa, agregando mais um dormitório, e espaço extra na sala. A casa Clip passa então a ser uma casa de 3 quartos e 108m².

Figura 53: Plantas baixas dos módulos A (54m²), A+B (81m²) e A+B+C (108m²)

Módulo A



Módulo A+B



Módulo A+B+C

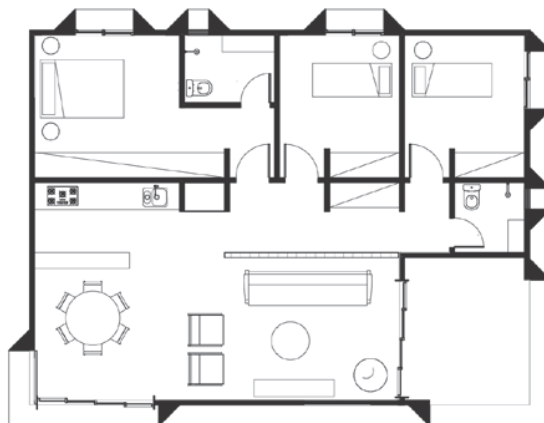


Figura 54: Vista interna da casa na versão dois quartos



Figura 55: Vista da varanda



O fato de o módulo inicial já contar com toda a infraestrutura de cozinha, lavanderia e banheiro permitem que a casa seja condensada em suas funções principais, e que seja ampliada sem a necessidade de modificar ou reformar o núcleo principal já existente.

A modularidade da construção permite que a casa seja montada – e desmontada – rapidamente, e o fato de seus materiais serem produzidos em fábricas garantem a qualidade dos componentes da construção. As aberturas externas envidraçadas são feitas em esquadrias de alumínio e vidro laminado comum, com acabamento jateado nos banheiros. As janelas contam com uma moldura que faz às vezes de um *brise soleil*. Como uma mesma casa pode ser montada em vários terrenos diferentes, e conseqüentemente diversas orientações solares, as proteções das janelas são tanto verticais quanto horizontais, e contam também com painel de venezianas de alumínio que permitem a ventilação noturna e maior segurança dos panos de vidro.

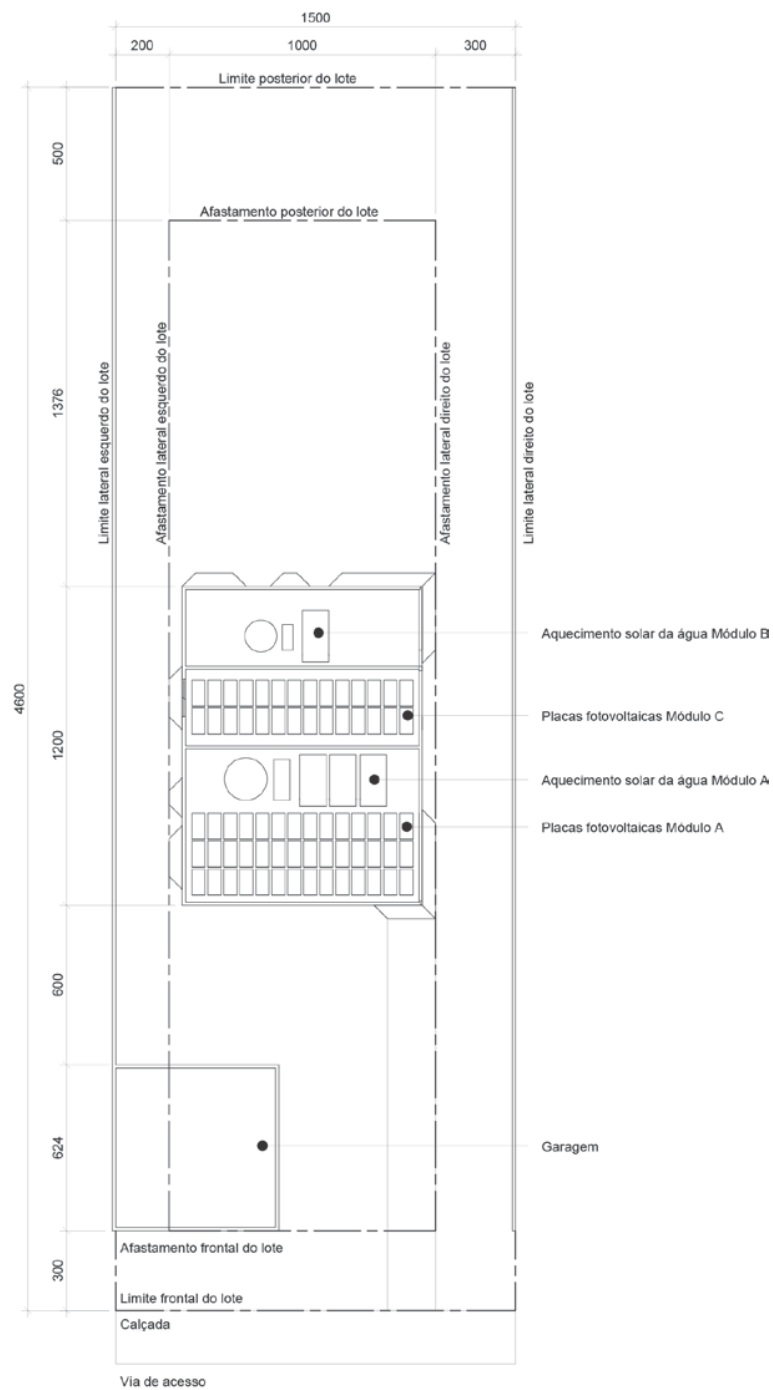
A casa é elevada em 25cm do solo para abrigar a passagem das tubulações. As fundações e infraestrutura de esgoto, cisterna para águas pluviais, e entrada de água da rede devem ser preparadas antes da chegada dos painéis pré-fabricados da casa ao terreno.

O sistema construtivo e estrutural ideal para a casa será definido a partir das simulações, que tem por objetivo definir qual a combinação de materiais que gera os melhores índices de conforto térmico a seus moradores com a menor necessidade de condicionamento artificial do ar.

Outro fator importante para o projeto foi o dimensionamento final da casa, principalmente no que diz respeito à largura, já que a área a ser trabalhada para implantação do “projeto ideal” são os condomínios localizados ao sudeste do Plano Piloto de Brasília. Será utilizado como exemplo o Condomínio Santa Mônica, em que os lotes têm área mínima de 700m² e largura mínima frontal de 15m. No entanto, os afastamentos laterais são de 2m, podendo ser de 3m em uma das laterais caso o lote dê acesso às áreas de servidão. Restam então 10m de largura para as casas construídas nos menores lotes. A casa tem 9m de largura, e proteções solares de 50cm nas laterais, totalizando 10m de largura, e podendo ser considerada para este lote.

As Figuras a seguir mostram os desenhos técnicos da casa, e indicam todos os fatores e dimensões que foram levados em consideração.

Figura 56: Planta de cobertura e de locação no terreno



Planta de Locação e Cobertura

Escala Gráfica

0 1 2 5

Figura 57: Planta baixa da residência

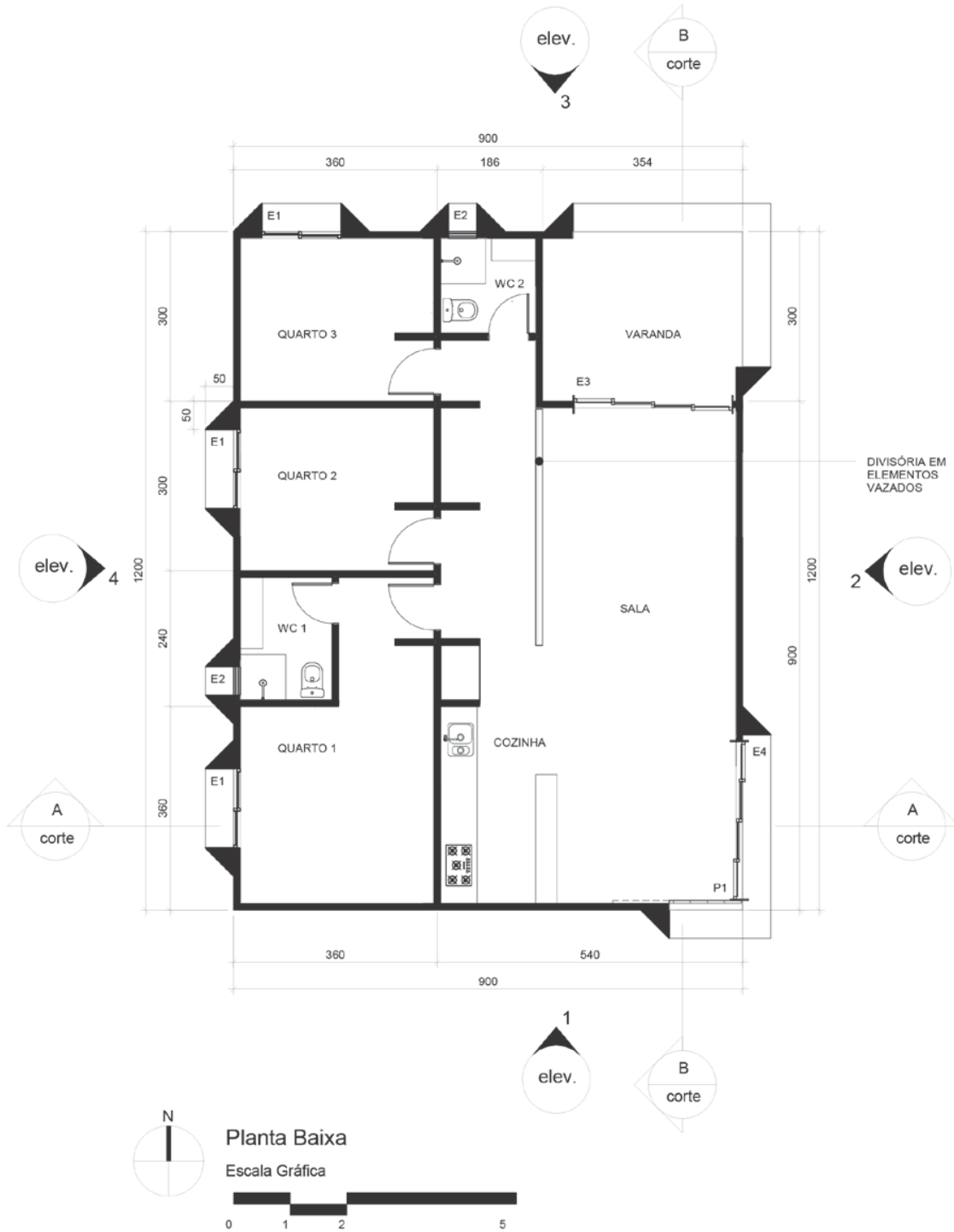
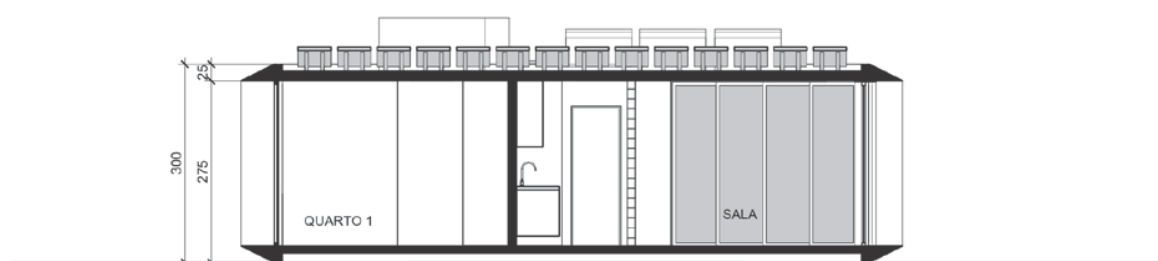
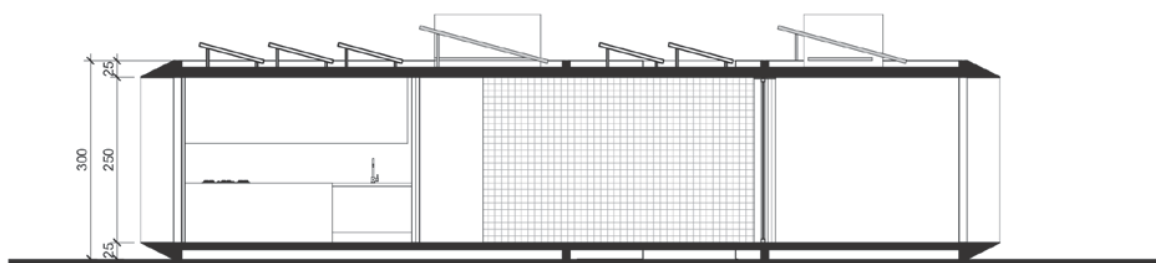


Figura 58: Cortes A (transversal) e B (longitudinal) da residência



Corte A



Corte B

Escala Gráfica



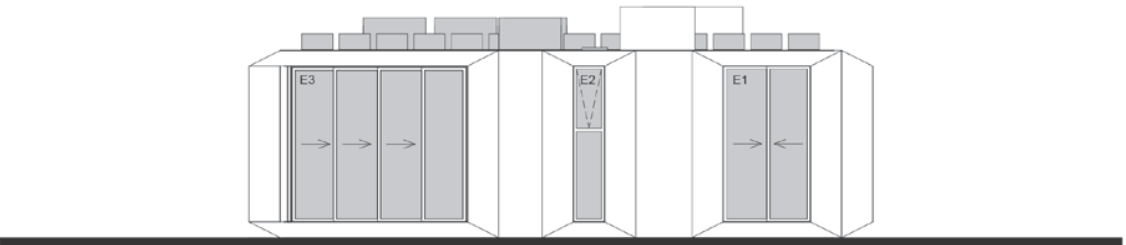
Figura 59: Elevações da residência



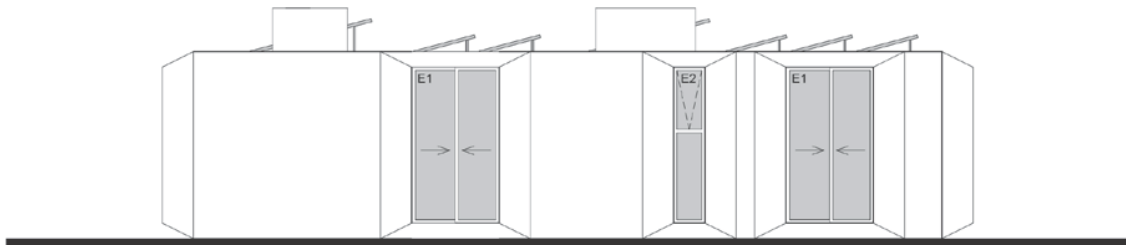
Elevação 1 - Sul



Elevação 2 - Leste



Elevação 3 - Norte



Elevação 4 - Oeste

Escala Gráfica



4.2 Características consideradas para as simulações de casas ZEBs pré-fabricadas

Para Lamberts (2014), o arquiteto pode racionalizar o uso da energia em um edifício, se reduzir o consumo em iluminação, condicionamento do ar e aquecimento de água. Para conseguir isto, existem três ideias: usar sistemas naturais de iluminação e condicionamento do ar; usar sistemas artificiais de maior eficiência; e integrar estes dois sistemas (natural e artificial). O potencial de redução deste setor é expressivo.

O conforto ambiental, neste caso mais especificamente conforto térmico e luminoso, dependem diretamente das características arquitetônicas e dos materiais utilizados na construção do edifício. Algumas características construtivas e arquitetônicas podem influenciar no consumo energético dos edifícios, como por exemplo a cobertura (cores e materiais, forma, inclinação, área); as paredes internas e externas (cores e materiais); o percentual de aberturas nas fachadas; o tipo de vidro; a orientação solar; a proteção solar de aberturas; a forma e compactidade da edificação; a porosidade da edificação (ventilação natural). A compreensão do comportamento e influência de cada uma destas características é de extrema importância para que o projeto de um edifício possa ser definido, pois dizem respeito às características da envoltória do edifício.

Para este trabalho teremos algumas das características arquitetônicas e os dados de consumo energético (densidades de potência instalada para os sistemas de ar-condicionado, iluminação artificial e equipamentos em geral) fixos e isolados. As variáveis serão os materiais de paredes e cobertura, para que seja possível saber como e quanto a escolha destes materiais influenciam no consumo energético da casa pré-fabricada. Deste modo, as estratégias a serem traçadas como resultado deste trabalho serão em sua maior parte relacionadas às estratégias passivas para eficiência energética, ou seja, estratégias de eficiência energética relacionadas ao edifício em si, e não apenas aos sistemas a ele acoplados.

4.2.1 Parâmetros fixos considerados nas simulações

- a. Tamanho do terreno (fixo)

Lote de 700m², largura frontal de 15m, afastamentos laterais de 2m e 3m.

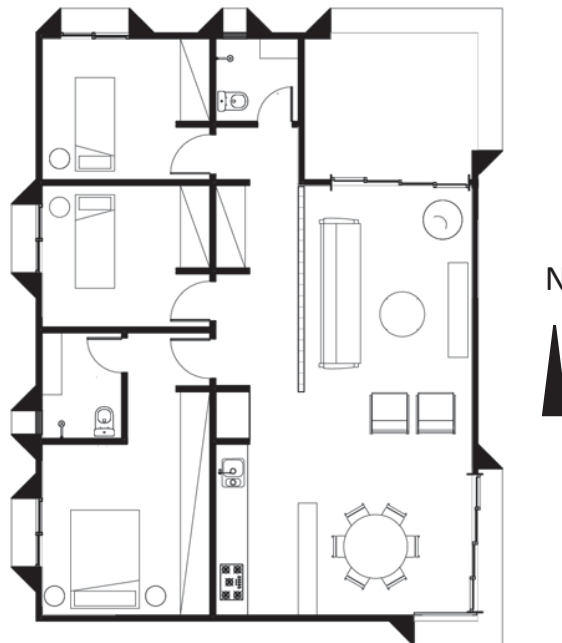
- b. Área da residência (fixo)

Para o condomínio escolhido, a área construída mínima exigida por lote é de 150m², e é obrigatória a construção de garagem coberta para no mínimo dois carros. A casa em sua maior conformação (3 quartos) conta com 108m². Para este projeto foi considerada a construção de uma garagem para dois carros destacada da casa, de dimensões 6x7m. Como a área de garagem conta como área construída, a residência passa a ter a metragem mínima exigida. No entanto, a área de garagem não contará para os cálculos de demanda energética da residência.

c. Orientação solar da residência (fixo)

Para a orientação solar da casa a ser simulada, será levada em consideração a pior orientação possível. Pelo fato de ser tratar de uma casa pré-fabricada, que pode ser montada em qualquer terreno e orientação, o fato de considerar a pior orientação garante que no caso de outras possíveis orientações solares a casa funcionará ainda melhor do ponto de vista térmico. Foi considerada, portanto, a orientação Oeste para a fachada com maior percentual de aberturas envidraçadas e menores ângulos de proteção. As edificações vizinhas e os muros laterais não serão considerados para o sombreamento da casa.

Figura 60: Orientação solar considerada para as simulações



No caso da orientação solar para o maior potencial das placas fotovoltaicas e de aquecimento de água, estes são fixos, e devem ser sempre voltados para o Norte.

d. Percentual de aberturas nas fachadas (fixo);

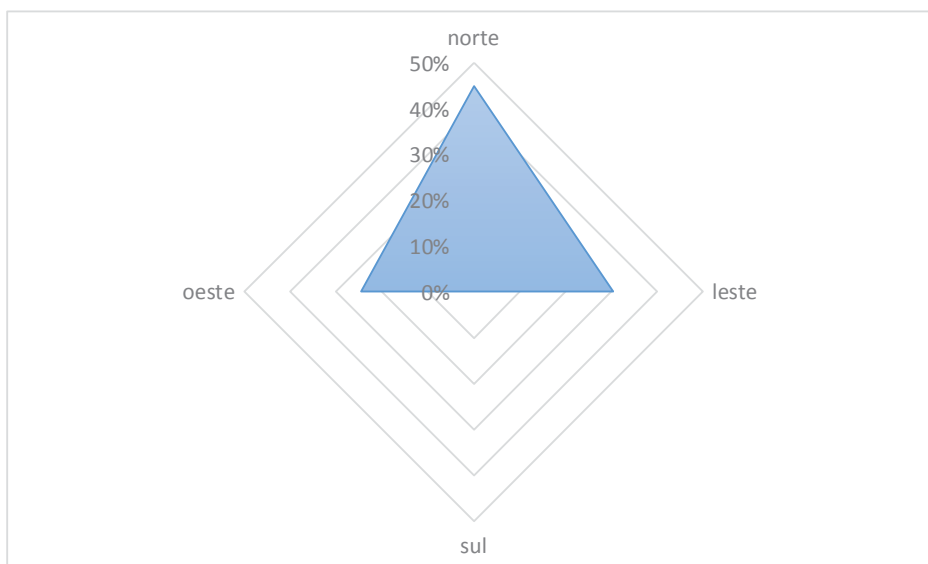
O percentual de aberturas nas fachadas foi calculado levando em conta a orientação solar proposta acima.

Tabela 9: Percentual de aberturas envidraçadas nas fachadas

Orientação	Área de fachada	Área de abertura	% de abertura
Norte	27m ²	11,75	43,5%
Leste	36m ²	7m ²	19%
Sul	27m ²	0m ²	0%
Oeste	36m ²	8,25m ²	23%

A Figura 61 mostra a distribuição dos percentuais de abertura para cada fachada da casa, e justifica a orientação escolhida para as simulações, que consideram as fachadas com maior percentual de aberturas voltadas para norte e oeste.

Figura 61: Distribuição de aberturas nas fachadas por orientação



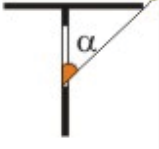
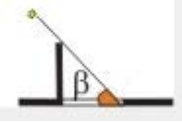
e. Tipo de vidro;

O tipo de vidro utilizado no modelo será vidro comum liso 4mm, fator solar 0,87.

f. Proteção solar de aberturas

As aberturas envidraçadas da casa têm ângulos de sombreamento horizontal e vertical de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10: Ângulos de sombreamento das aberturas envidraçadas

Esquadria	Ângulo vertical de sombreamento	de	Ângulo horizontal de sombreamento
E1 (1,40x2,50m)			
	Esquerda: 20° / Direita: 20°		11°
E2 (0,50x2,50m)	Esquerda: 45° / Direita: 45°		11°
E3 (2,80x2,50m)	Esquerda: 50° / Direita: 10°		54°
E4 (2,80x2,50m)	Esquerda: 10° / Direita: 0°		11°

g. Porosidade da edificação (ventilação natural).

Temos a área de piso da casa de 108m² e a área de ventilação de 17,2m², representando portando 16% da área do piso.

Tabela 11: Áreas de ventilação

Esquadria	Área de abertura	Área de ventilação	de	Qtde	Área total de ventilação
1	1,40 x 2,50 = 3,5m ²	50% = 1,75m ²		3	5,25m ²
2	0,50 x 2,50 = 1,45m ²	50% = 0,725m ²		2	1,45m ²
3	2,80 x 2,50 = 7m ²	75% = 5,25m ²		1	5,25m ²
4	2,80 x 2,50 = 7m ²	75% = 5,25m ²		1	5,25m ²
		Total		8	17,2m ²

4.2.2 Variáveis de projeto consideradas nas simulações: materiais e sistemas construtivos

Os materiais de cobertura e de paredes serão variáveis nas simulações. Esta variação permitirá definir quais os materiais disponíveis na indústria brasileira que mais se adequam às residências de balanço energético nulo para a cidade de Brasília. A escolha dos materiais a

serem testados nas simulações se deu a partir da avaliação de características térmica de painéis pré-fabricados oferecidos pela indústria brasileira, descritos no capítulo de revisão de literatura.

As propriedades térmicas dos materiais testados estão descritas mais a frente, no tópico dos dados de entrada das simulações termo energéticas. Em muitos casos, a indústria brasileira não fornece em seus manuais, catálogos técnicos ou websites os dados necessários para o input nos softwares de simulação. Para estes casos, os dados considerados foram valores extraídos da NBR 15220.

4.3 Simulações do desempenho térmico e energético

Para as simulações de desempenho térmico e energético será utilizado o *software Design Builder*, que segue os algoritmos de cálculo do software Energy Plus (SILVA, 2016). A versão do programa utilizada é a 2.4.0.1.

Foram modelados diferentes materiais para compor a envoltória da casa, e as simulações permitirão comparar quais são as combinações de materiais com melhor e pior desempenho termo energético. Para a análise de desempenho térmico, serão utilizados os dados de temperatura operativa das zonas térmicas da casa. Com estes dados será possível calcular o percentual de horas do ano em que a casa se encontra na zona de conforto, e analisar se a mesma precisa de uso de ar condicionado ou não. Para a análise energética, serão utilizados os dados de consumo energético da casa com e sem o uso de ar condicionado, permitindo comparar a variável materiais x consumo energético.

4.3.1 Arquivo climático

As simulações foram realizadas com o arquivo climático EPW – *Energy Plus Weather File* (INMET, 2016) para a cidade de Brasília (Latitude 15° 46' 48" Sul, Longitude 47° 55' 45" Oeste). Os arquivos climáticos contêm informações sobre as características de cada região geográfica do Brasil e representam um ano típico de uma série de 10 anos (GOULART ET AL, 1998). Os dados dos arquivos são horários, e apresentam cada uma das 8760 horas do ano, possibilitando uma avaliação horária precisa das simulações.

4.3.2 Propriedades térmicas da envoltória

As propriedades termo físicas dos materiais, a forma arquitetônica, a orientação das paredes e aberturas são determinantes no desempenho térmico interno de uma edificação em relação ao ambiente externo em que se insere. Os componentes da envoltória (paredes, cobertura, aberturas e piso) das edificações que separam o ambiente interno do externo são essenciais para a determinação dos ganhos e perdas de calor de um meio para outro.

Neste trabalho os componentes piso e aberturas serão isolados como variáveis fixas. Foi utilizado um mesmo valor de propriedades termo físicas para os vidros, e para o piso. No caso dos vidros, foi considerado um vidro transparente simples de 4mm de espessura, transmitância térmica de 5,385 W/m².K, transmitância visível de 0,89 e fator solar 0,87. Para o piso, foi modelada uma única composição, composta por uma camada de piso cerâmico de 10mm, argamassa de nivelamento de 20mm, e laje armada de 100mm. A transmitância térmica total do conjunto é de 0,25 W/m².K.

Foram modeladas sete composições de paredes, e cinco composições de coberturas, de acordo com os materiais e sistemas construtivos mais utilizados em edifícios pré-fabricados no Brasil. As paredes internas e externas foram consideradas as mesmas. Algumas combinações de componentes não atendem aos critérios da Norma NBR-15575-4 no critério capacidade térmica para a cidade de Brasília, Zona Bioclimática 4. No entanto, foram considerados mesmo assim para as simulações por representarem materiais pré-fabricados frequentemente utilizados. Muitos dos fabricantes não apresentam em seus catálogos técnicos do produto os dados térmicos necessários para a modelagem dos materiais no programa de simulação, portanto, nos casos de ausência de dados, foram utilizados dados da NBR 15220-2 como referência.

4.3.2.1 Características das Coberturas

Foram modeladas cinco composições de cobertura, descritas na Tabela 12.

Tabela 12: Características térmicas das coberturas

Descrição	Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Densidade (kg/m ³)	Absortância	Transmitância (W/m ² .K)
Placa de CLT (<i>Cross Laminated Timber</i>) com 200mm de espessura, e aplicação de manta impermeabilizante aluminizada (3mm) na face externa.	Manta aluminizada	0,003	0,23	1460	1000	0,05	0,59
	CLT	0,20	0,13	2100	550	-	
Isotelha EPS, telha metálica tipo sanduíche com preenchimento em EPS (poliestireno expandido), com 100mm de espessura, e pintura branca nas duas faces, tanto interna quanto externa.	Chapa metálica externa	0,00050	55	460	7800	0,2	0,34
	Núcleo em EPS	0,0907	0,032	1420	40	-	
	Chapa metálica interna	0,00043	55	460	7800	-	
Laje painel treliçada com 160mm de espessura e aplicação de manta impermeabilizante aluminizada (3mm) na face externa.	Manta aluminizada	0,003	0,23	1460	1000	0,05	0,33
	Concreto	0,04	1,75	1000	2200	-	
	EPS	0,09	0,032	1420	40	-	
	Concreto	0,03	1,75	1000	2200	-	
Isotelha PUR, telha metálica tipo sanduíche com preenchimento em PUR (poliuretano), com 100mm de espessura, e pintura branca nas duas faces, tanto interna quanto externa.	Chapa metálica externa	0,00050	55	460	7800	0,2	0,21
	Núcleo em PUR	0,0907	0,02	1420	40	-	
	Chapa metálica interna	0,00043	55	460	7800	-	
Placa de CLT (<i>Cross Laminated Timber</i>) com 200mm de espessura, aplicação de manta asfáltica impermeabilizante (3mm) na face externa, e instalação de sistema laminar médio ecotelhado para teto verde.	Vegetação e terra	0,105	1,0	880	1460	-	0,50
	Ar	0,02	0,023	1012	1,20	-	
	Água	0,05	0,6	4190	1000	-	
	Manta impermeabilizante	0,003	0,23	1460	1000	-	
	CLT	0,20	0,13	2100	550	-	

4.3.2.2 Características das Paredes

Foram modeladas sete composições de paredes, descritas na Tabela 13.

Tabela 13: Características térmicas das paredes

Descrição	Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Densidade (kg/m ³)	Absortância	Transmitância (W/m ² .K)
Placa de CLT (Cross Laminated Timber) com 200mm de espessura, e aplicação de pintura branca nas faces interna e externa.	CLT	0,20	0,13	2100	550	0,2	0,58
Sistema de paredes secas (dry wall), composto por placa cimentícia nas faces externas, núcleo de lã de rocha, e placa de gesso acartonado nas faces internas, com 120mm de espessura total, e pintura branca nas duas faces, tanto interna quanto externa.	Placa fibrocimento	0,01	0,95	840	2200	0,2	2,08
	Núcleo em lã de rocha	0,092	0,033	750	90	-	
	Placa de gesso acartonado	0,018	0,35	840	750	0,2	
Painel de fachada LDR, composto de telha metálica tipo sanduíche com preenchimento em lã de rocha, com 200mm de espessura, e pintura branca nas duas faces, tanto interna quanto externa.	Chapa metálica externa	0,0050	55	460	7800	0,2	0,16
	Núcleo em lã de rocha	0,1885	0,033	750	90	-	
	Chapa metálica interna	0,0065	55	460	7800	-	
Painel de fachada Isofachada PUR, formado por telha metálica tipo sanduíche com preenchimento em PUR (poliuretano), com 100mm de espessura, e pintura branca nas faces interna e externa.	Chapa metálica externa	0,0050	55	460	7800	0,2	0,19
	Núcleo em PUR	0,0907	0,02	1420	40	-	
	Chapa metálica interna	0,0043	55	460	7800	-	
Sistema Monolite formado por núcleo em EPS (poliestireno expandido) com 150mm de espessura e revestimento em argamassa armada com pintura branca nas faces interna e externa.	Argamassa armada e pintura branca	0,025	1,15	1000	2100	0,2	0,20
	Núcleo em EPS	0,15	0,032	1420	40	-	
	Argamassa armada e pintura branca	0,025	1,15	1000	2100	-	

Painel Thermopore, com 125mm de espessura total, revestido em placas cimentícias com pintura branca, tanto na face interna quanto na externa.	Placa fibrocimento	0,01	0,95	840	2200	0,2	3,95
	Thermopore	0,105	1,7	1000	750	-	
	Placa fibrocimento	0,01	0,95	840	2200	-	
Painel de tijolos cerâmicos e argamassa armada, com 140mm de espessura, e pintura branca nas duas faces, tanto interna quanto externa.	Argamassa armada e pintura branca	0,025	1,15	1000	2100	0,2	1,65
	Bloco cerâmico	0,01	0,9	920	1300	-	
	Ar	0,03	0,023	1012	1,20	-	
	Bloco cerâmico	0,01	0,9	920	1300	-	
	Ar	0,03	0,023	1012	1,20	-	
	Bloco cerâmico	0,01	0,9	920	1300	-	
	Argamassa armada e pintura branca	0,025	1,15	1000	2100	0,2	

4.3.2.3 Combinações de paredes e coberturas simuladas

Os cinco tipos de cobertura e os cinco tipos de paredes modelados foram combinados entre si, gerando 35 diferentes combinações de materiais de envoltória a serem simulados e comparados entre si. As simulações de desempenho térmico permitirão verificar quais materiais tem melhor desempenho para a envoltória da casa.

Tabela 14: Combinações de cobertura e parede avaliadas

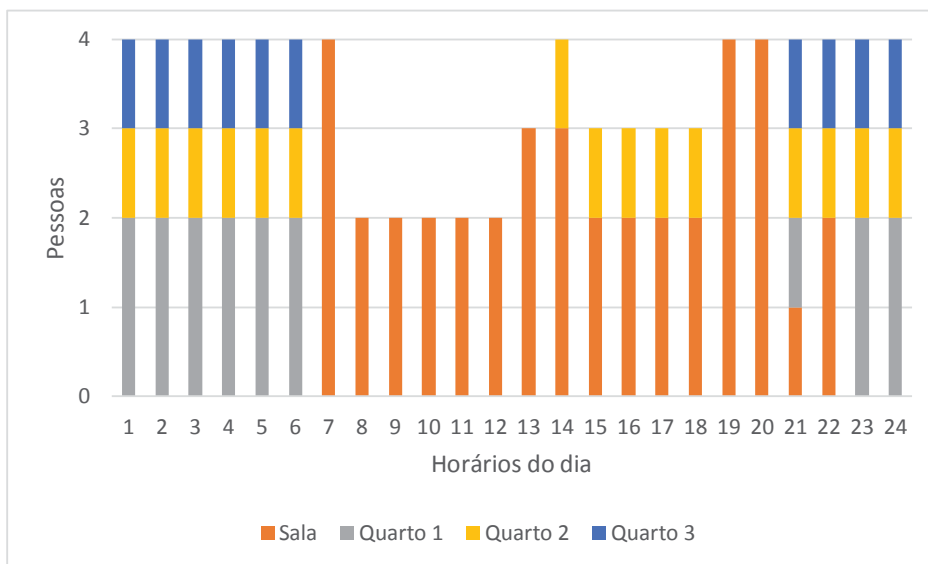
Material cobertura	de	Material parede	de
CLT+manta		CLT 200mm	
CLT+manta		Dry wall 120mm	
CLT+manta		LDR 200mm	
CLT+manta		Isfachada PUR	
CLT+manta		Monolite 200mm	
CLT+manta		Thermopore	
CLT+manta		Painel Tijolo 140mm	
Laje Painel		CLT 200mm	
Laje Painel		Dry wall 120mm	
Laje Painel		LDR 200mm	
Laje Painel		Isfachada PUR	
Laje Painel		Monolite 200mm	

Laje Painei	Thermopore
Laje Painei	Painei Tijolo 140mm
CLT+teto verde	CLT 200mm
CLT+teto verde	Dry wall 120mm
CLT+teto verde	LDR 200mm
CLT+teto verde	Isofachada PUR
CLT+teto verde	Monolite 200mm
CLT+teto verde	Thermopore
CLT+teto verde	Painei Tijolo 140mm
Isotelha EPS	CLT 200mm
Isotelha EPS	Dry wall 120mm
Isotelha EPS	LDR 200mm
Isotelha EPS	Isofachada PUR
Isotelha EPS	Monolite 200mm
Isotelha EPS	Thermopore
Isotelha EPS	Painei Tijolo 140mm
Isotelha PUR	CLT 200mm
Isotelha PUR	Dry wall 120mm
Isotelha PUR	LDR 200mm
Isotelha PUR	Isofachada PUR
Isotelha PUR	Monolite 200mm
Isotelha PUR	Thermopore
Isotelha PUR	Painei Tijolo 140mm

4.3.3 Padrão de ocupação e iluminação

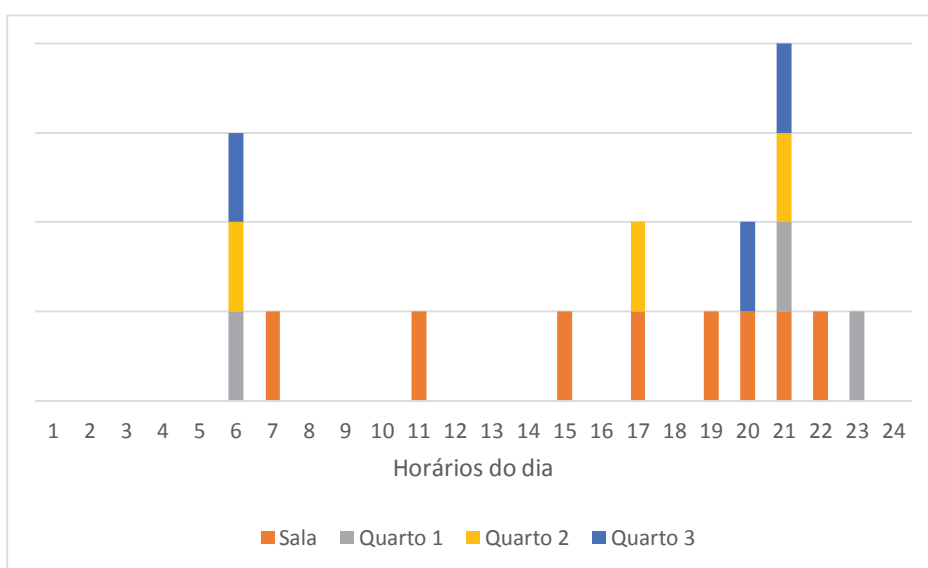
O padrão de ocupação representa uma família de 4 moradores: um casal e dois filhos. No período de 9h às 12h duas pessoas permanecem na residência; das 13h às 19h, três pessoas permanecem na residência, e a partir das 19h todos estão em casa. O ambiente da sala e cozinha é ocupado por todos os moradores, o quarto 1 tem ocupação máxima de duas pessoas, e os quartos 2 e 3 tem ocupação de uma pessoa cada. Não foram considerados períodos de férias ou feriados, em que a casa poderia estar desocupada.

Figura 62: Padrão de ocupação da casa



O padrão de iluminação da residência está vinculado ao padrão de ocupação. Foi considerado que os usuários utilizam a iluminação durante a maior parte do tempo, ligando a iluminação artificial apenas em 30% das horas deste período (das 8h às 18h), distribuídas em horários aleatórios nos ambientes ocupados durante o período. Para os banheiros da residência, foi considerado apenas 1h de uso da iluminação artificial, uma vez que estes configuram ambientes de curta permanência dos usuários.

Figura 63: Padrão de uso da iluminação artificial da casa



Baseado nas atividades exercidas em cada ambiente da casa, foram estabelecidas as taxas metabólicas para cada atividade. Os valores das taxas metabólicas foram extraídos da tabela da ASHRAE (2013), sendo de $45\text{W}/\text{m}^2$ nos dormitórios, $60\text{W}/\text{m}^2$ na sala e $95\text{W}/\text{m}^2$ na cozinha. Para o cálculo do calor dissipado por pessoa, considerou-se como área de pele média o valor de $1,80\text{m}^2$. Como no projeto analisado os ambientes sala e cozinha são integrados, considerou-se o maior valor para este ambiente. Temos portanto o valor de $81\text{W}/\text{pessoa}$ nos dormitórios e $171\text{W}/\text{pessoa}$ na sala e cozinha. A fração radiante considerada referente à carga térmica das pessoas é de 0,3.

Nos dormitórios, sala de estar e cozinha, considerou-se uma densidade de potência de iluminação artificial de $5,0\text{W}/\text{m}^2$. A definição da baixa densidade de potência de iluminação artificial é devido ao uso de lâmpadas LED de acordo com o projeto da casa, em todos os ambientes.

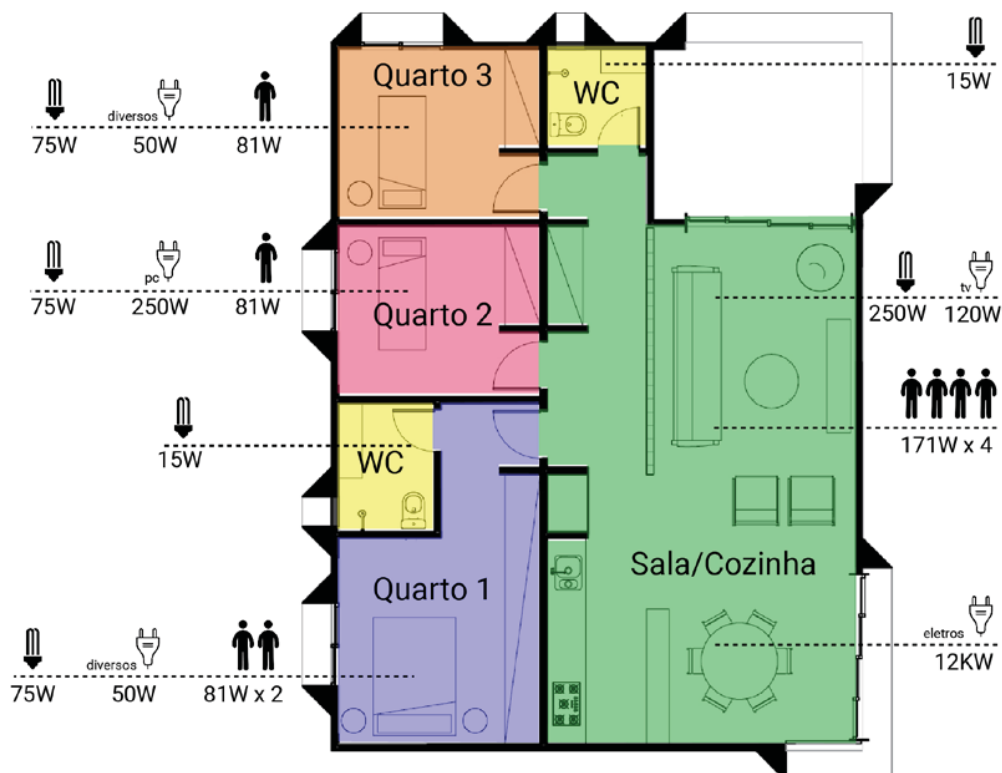
4.3.4 Cargas internas de equipamentos

Para a previsão de consumo energético da casa serão considerados equipamentos eficientes, e hábitos de uso destes equipamentos adequados. Parte importante do balanço energético nulo é a eficiência e uso consciente da energia elétrica. No entanto, por se tratar de uma casa que produzirá energia elétrica, procurou-se utilizar equipamentos cuja fonte de energia é a elétrica (como é o caso do *cooktop* de indução e forno elétrico ao invés dos modelos a gás). Para o aquecimento da água foi considerado sistema de aquecimento solar, portanto, as cargas equivalentes a chuveiro elétrico foram desconsideradas.

A Tabela 15 apresenta as cargas internas de equipamentos, e o respectivo número de horas de uso na sala de estar, cozinha e dormitórios. As horas de uso estão relacionadas ao padrão de ocupação da residência. Como falado em capítulos anteriores, o conceito de balanço energético nulo baseia-se em cálculos anuais de consumo e produção de energia elétrica. Portanto, para o cálculo da previsão de consumo mensal por 12 meses da casa serão considerados os parâmetros relacionados na Tabela 15.

Estes valores de consumo mensal serão considerados fixos, pois independem do desempenho térmico da envoltória. A Figura 64 caracteriza as cargas internas na edificação relativas a iluminação, equipamentos e pessoas em cada zona térmica (ambiente) da casa. Os valores e tempos de uso estimados desconsideram períodos de férias e sazonalidade do clima.

Figura 64: Cargas internas na casa

Tabela 15: Cargas de equipamentos⁹

Ambiente	Equipamento	Fração radiante	Potência (Watts)	Período (horas diárias)
Cozinha	Geladeira	0,5	85,0	24 ¹⁰
Cozinha	Cooktop indução	0,5	7.200,0	0,5
Cozinha	Forno	0,5	2.500,0	0,5
Cozinha	Diversos	0,5	50,0	2
Cozinha	Lava louças	0,5	1.500,0	1
Lavanderia	Lava e seca	0,5	1.500,0	0,42
Sala	Televisor	0,5	120,0	8
Quarto 1	Diversos	0,5	50,0	2
Quarto 2	Computador	0,5	250,0	3
Quarto 2	Diversos	0,5	50,0	2
Quarto 3	Diversos	0,5	50,0	2

⁹ As cargas de aparelhos em *standby* foram desconsideradas.

¹⁰ O termostato que regula a função liga e desliga do motor da geladeira foi desconsiderado.

Será utilizado como parâmetro fixo para as simulações o consumo energético por metro quadrado calculado anteriormente para cada ambiente, e de acordo com o padrão de ocupação e uso dos equipamentos. É importante lembrar que este valor desconsidera em um primeiro momento o uso de sistema de climatização do ar.

Tabela 16: Consumo energético por metro quadrado

Ambiente	Potência (kWh/m²)	Período (horas)
Sala Cozinha	e 18,0	24
Quarto 1	5,0	2
Quarto 2	5,0	9
Quarto 3	5,0	2

4.3.5 Modelagem da ventilação natural

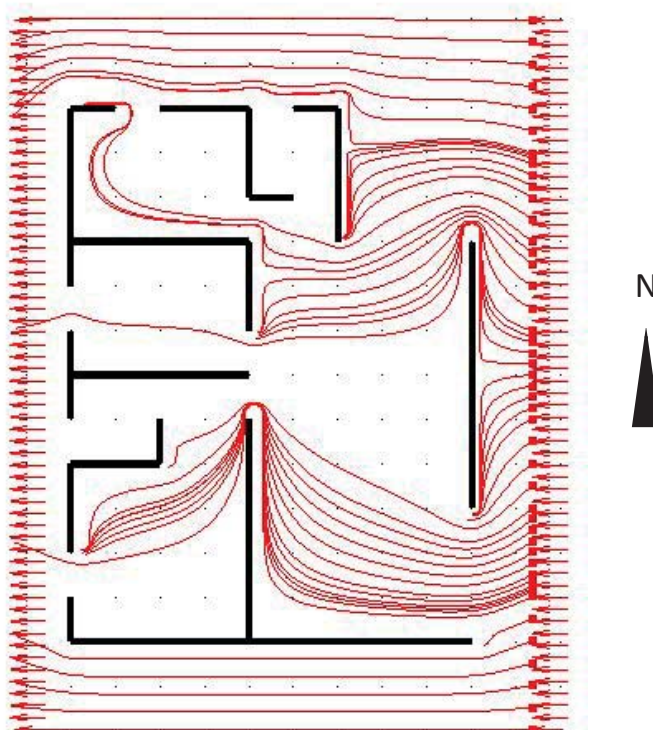
Para simular a ventilação cruzada e verificar o escoamento de ar dentro da casa, foi utilizado o software gratuito Fluxovento¹¹. O sistema pode simular diversas condições geométricas inserindo anteparos externos tanto em planta baixa como em corte. Os resultados depois da análise são linhas de correntes onde se pode ver regiões de concentração e rarefação dentro do ambiente construído pelo usuário. A análise é simplificada (Figura 65), pois não indica velocidade do ar, e efeitos como vórtices (movimentos de turbilhonamentos), servindo apenas para permitir uma visualização rápida da distribuição do fluxo de vento no interior da edificação.

A orientação solar é a mesma utilizada nas simulações térmicas, e a direção predominante dos ventos para Brasília foi considerada Leste, por ser a direção com maior frequência de ocorrência, de acordo com a caracterização do clima da cidade descrita anteriormente.

Apesar das altas taxas de renovação do ar permitidas pelo dimensionamento das janelas da residência, para as simulações foram consideradas 15 trocas de ar por hora, representando um valor suficiente para a ventilação estrutural ou seletiva, que considera refrescar ou aquecer o interior utilizando a diferença de temperatura externa e interna, e varia de 10 a 20 renovações por hora (SILVA, 2016).

¹¹ Software gratuito desenvolvido por Carlos Vitor de Alencar Carvalho e Luiz Fernando Martha. Disponível para download em: http://www.ecivilnet.com/software/fluxovento_analise_ventilacao.htm

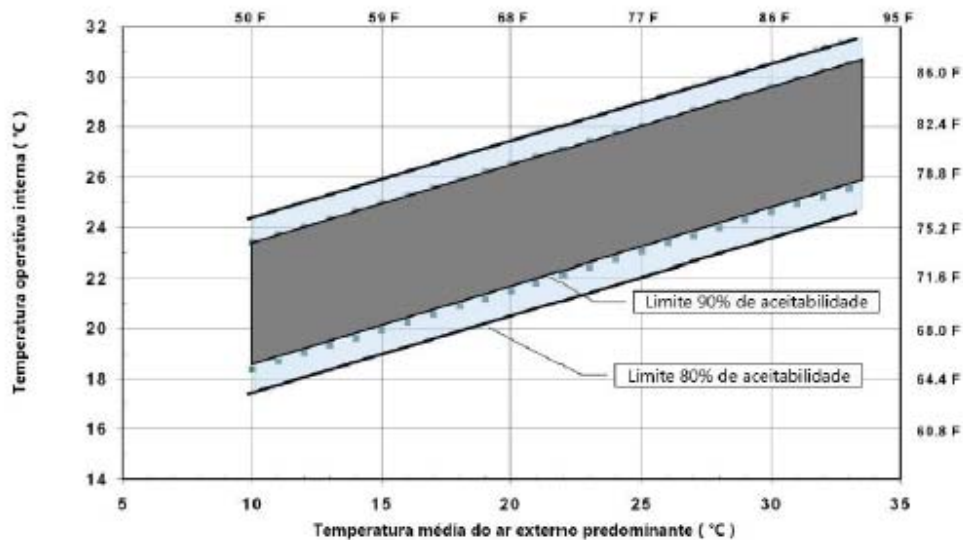
Figura 65: Distribuição do fluxo de vento no interior da edificação



4.3.6 Condições de conforto e aceitabilidade dos usuários de acordo com a norma ASHRAE 55-2013

A determinação das condições de conforto térmico e aceitabilidade dos usuários da ASHRAE Standard 55 (2013) em espaços ventilados naturalmente é realizada a partir do gráfico da Figura 66 a seguir, que fixa os valores aceitáveis de temperatura operativa interna do ambiente para um limite de 80% de satisfação dos usuários em função da temperatura média do ar externo predominante. O limite de 90% é de caráter informativo, e não será considerado para este trabalho. O gráfico já considera os efeitos de desconforto térmico localizado, roupa, atividade metabólica, umidade e velocidade do ar, portanto essas variáveis não precisam ser analisadas isoladamente (ASHRAE, 2013).

Figura 66: Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente ventilados



Fonte: ASHRAE, 2013 (adaptada com tradução para o português)

As equações abaixo indicam os limites de temperatura operativa apresentados no gráfico (ASHRAE, 2013):

Limite superior de 80% de aceitabilidade (°C) = $0,31 \times tpma(out) + 21,3$

Limite inferior de 80 % de aceitabilidade (°C) = $0,31 \times tpma(out) + 14,3$

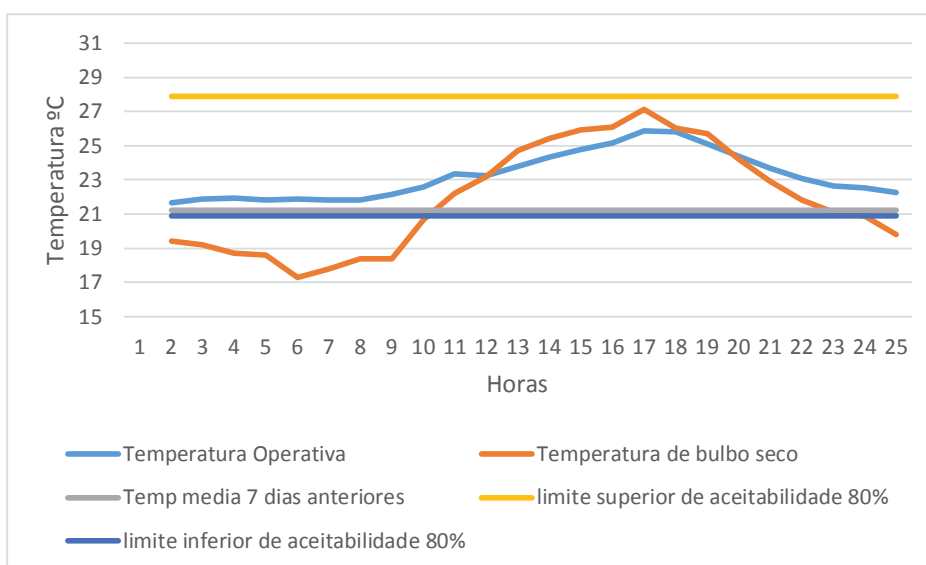
Em que

$tpma(out)$ é a temperatura média do ar externo predominante.

Neste trabalho considerou-se o limite de 80% para a avaliação do conforto dos usuários na edificação. A temperatura média do ar externo predominante é calculada a partir da média aritmética simples de todas as temperaturas médias do ar externo, considerando não menos que os 7 dias e não mais que os 20 dias anteriores em relação ao dia de referência. A temperatura média do ar externo deve ser obtida por meio de uma média aritmética simples de todas as medições de temperatura externa de bulbo seco para as 24 horas do dia (ASHRAE, 2013). Neste estudo, os valores de temperatura média do ar externo predominante foram calculados através da média aritmética das temperaturas externas dos últimos 7 dias em relação ao dia de referência. As temperaturas de bulbo seco horárias foram extraídas do arquivo climático epw do INMET (2016) para a cidade de Brasília.

Para auxiliar a compreensão do método usado pela norma, foi elaborado um gráfico que mostra as temperaturas externas de bulbo seco diárias para o dia de referência, a temperatura média do ar externo predominante dos 7 dias anteriores, e a temperatura operativa interna de um ambiente. O gráfico foi feito para um dia aleatório do ano, apenas para exemplificação. O gráfico representa o dia 21 de março, e neste exemplo todas as horas do dia encontram-se na zona de conforto para 80% dos usuários, de acordo com a norma ASHRAE 55 (2013).

Figura 67: Análise da temperatura operativa e limites de aceitabilidade



A norma prevê ainda um aumento do limite superior de aceitabilidade do gráfico da Figura 66 caso a temperatura operativa seja maior que 25°C e a velocidade do ar seja maior que 0,3 m/s. Os valores do aumento devem estar de acordo com a Tabela 17 (ASHRAE, 2013).

Tabela 17: Aumento nos limites de temperatura operativa aceitável em ambientes naturalmente condicionados

Velocidade do ar até 0,6 m/s	Velocidade do ar até 0,9 m/s	Velocidade do ar até 1,2 m/s
1,2°C	1,8°C	2,2°C

Fonte: ASHRAE, 2013

Para este trabalho foi desconsiderado o aumento dos limites superiores de conforto do gráfico da Tabela 17 para velocidades do ar interno maiores que 0,3m/s e para temperatura operativa acima de 25°C.

Para avaliar a edificação de acordo com a ASHRAE Standard 55 (2013) foi necessário realizar uma simulação computacional da edificação no programa *Design Builder* para se obter as temperaturas operativas horárias internas dos ambientes de permanência prolongada durante o período de um ano. Os ambientes de permanência prolongada considerados foram os quartos e a sala/cozinha. Estes valores alimentaram o gráfico que indica os limites da faixa de temperatura operativa aceitável e a partir disso foi possível calcular o percentual de horas totais do ano em que cada ambiente encontrava-se em conforto e desconforto térmico.

De acordo com a seção 7.4.2.2.1 da ASHRAE 55 – 2013, as horas que excedem os limites superior e inferior devem ser atribuídas a valores “0” (zero) para aquelas que encontram-se dentro dos limites, ou “1” (um), para as horas que estão fora dos limites, de modo a que possam ser somadas, e resultar no número total de horas de desconforto do ano. Além disso, é possível multiplicar estes valores (zero e um) pela diferença entre a média da temperatura externa usada como parâmetro de avaliação e a temperatura operativa interna, e verificar a quantidade de graus hora excedentes para frio ou para calor no ano.

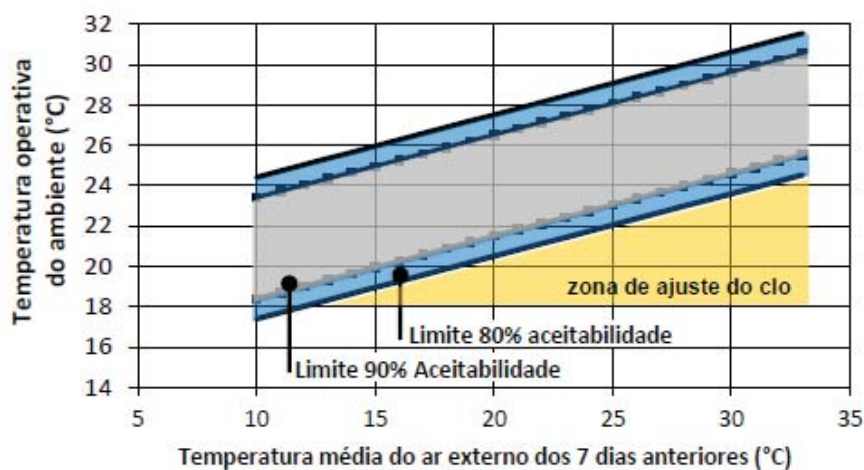
4.3.7 Dimensionamento do sistema de condicionamento artificial de ar

Após a análise do percentual de horas de conforto para cada combinação de materiais de parede e coberturas, serão identificadas as horas que excedem os limites superiores e inferiores, que podem também ser chamadas de horas de desconforto para cada modelo. Para as combinações em que todos os ambientes obtiveram no mínimo 80% das horas dentro da zona de conforto, caso ocorra, será desconsiderado o uso de equipamentos para condicionamento artificial do ar.

No caso de desconforto por frio, até o limite mínimo de 18°C para a temperatura operativa no interior da edificação, considerou-se que o usuário se aclimata as condições do ambiente, ajustando a vestimenta para evitar o desconforto por frio (DE VECCHI et al., 2014). A Figura 68 apresenta os limites de aceitabilidade da ASHRAE 55/2013, conforme a proposto por De Vecchi et al., 2014 a zona de adaptação do clo. Caso os resultados apresentem temperaturas operativas abaixo de 18°C, deve ser considerado o uso de aquecimento artificial do ar.

Outras propostas de sistemas de condicionamento do ar poderiam ser utilizadas, como ventilação mecânica, resfriamento evaporativo, dentre outros. No entanto, para este trabalho optou-se por considerar o ar-condicionado tipo Split pelo fato deste sistema representar o pior cenário do ponto de vista do consumo energético.

Figura 68: Limites de aceitabilidade inferior da ASHRAE 55 – 2013 e zona de ajuste do clo



Fonte: ASHRAE 55-2013. Adaptado de De Vecchi et al (2014)

Com os dados de horas de desconforto por calor, e o cálculo do consumo de eletricidade necessários para o condicionamento do ar, será possível avaliar quais das combinações de materiais tem os maiores e os menores consumos de energia elétrica.

Através do simulador de capacidade para aparelhos, foram definidas as potências de cada aparelho a ser utilizado por ambiente.

Tabela 18: Estimativa da potência dos aparelhos de ar-condicionado por ambiente

Ambiente	Área (m ²)	Iluminação	Orientação solar	Número de pessoas	Equipamentos	Capacidade do aparelho (BTU)	Potência do aparelho (W)
Sala	47,75	Led	Leste	4	Televisor e refrigerador	2x18.000	2x1600
Quarto 1	15,75	Led	Oeste	2	Televisor	18.000	1600
Quarto 2	9,85	Led	Oeste	1	Televisor	9.000	815
Quarto 3	9,85	Led	Norte/Oeste	1	Televisor e computador	9.000	815

Fonte: <http://www.lg.com/br/simulador-de-capacidade/index.jsp>

Com os resultados de horas excedentes do limite superior de conforto ao ano para cada combinação de material, poderemos calcular a potência anual destinada aos aparelhos condicionadores de ar para cada ambiente.

4.4 Simulações da estimativa de geração de energia

Para a produção de energia local, a produção de energia será voltada para o aquecimento solar da água, e para fontes fotovoltaicas. No entanto, não será considerada a possibilidade de uso de placas fotovoltaicas nas fachadas devido à proximidade da casa aos muros laterais e seu possível sombreamento. Este parâmetro fixa-se também em relação à área de telhado disponível para instalação dos equipamentos.

Para o módulo inicial da casa proposta, a área disponível de cobertura é de 54m². Neste módulo deve ser instalada a potência para suprir o aquecimento da água utilizada no primeiro banheiro, e na cozinha (pia, máquina lava-louças e lava-roupas), além das placas fotovoltaicas para suprir todos os equipamentos de cozinha. Na instalação do módulo B é acrescida uma caixa d'água e sistema de aquecimento solar independente. Isso ocorre pelo fato deste módulo crescer um banheiro à casa. Na instalação do módulo C, não são acrescentados sistemas de aquecimento de água ou fotovoltaicos.

Será utilizada também para as simulações de geração de energia a casa de maior tamanho, 108m², considerando os 3 módulos de cobertura. No entanto, a área ocupada pelas placas fotovoltaicas corresponde apenas à área de cobertura do primeiro módulo, tendo o sistema de aquecimento da água e as caixas d'água será descontada da área total de cobertura. Portanto, a área considerada disponível para instalação de placas fotovoltaicas é de 44m².

A orientação dos painéis de aquecimento da água e das placas fotovoltaicas deve ser voltada para o Norte, e ter inclinações de 30° em relação à superfície plana do telhado. Cada placa deve contar com um suporte metálico em sua instalação para garantir a inclinação projetada, uma vez que a cobertura da residência em questão é plana. O espaço entre a placa e a cobertura deve permitir ventilação da parte inferior das placas.

O software utilizado para estimar a geração local de eletricidade do sistema fotovoltaico é o PVSyst v.6.47 (PVSYST, 2016). A base de dados para os valores sintéticos de irradiação global horizontal e difusa, e temperatura média mensal do ar é do MeteoNorm 7.1 (1991-2010). A Tabela 19 mostra os parâmetros utilizados para a cidade de Brasília.

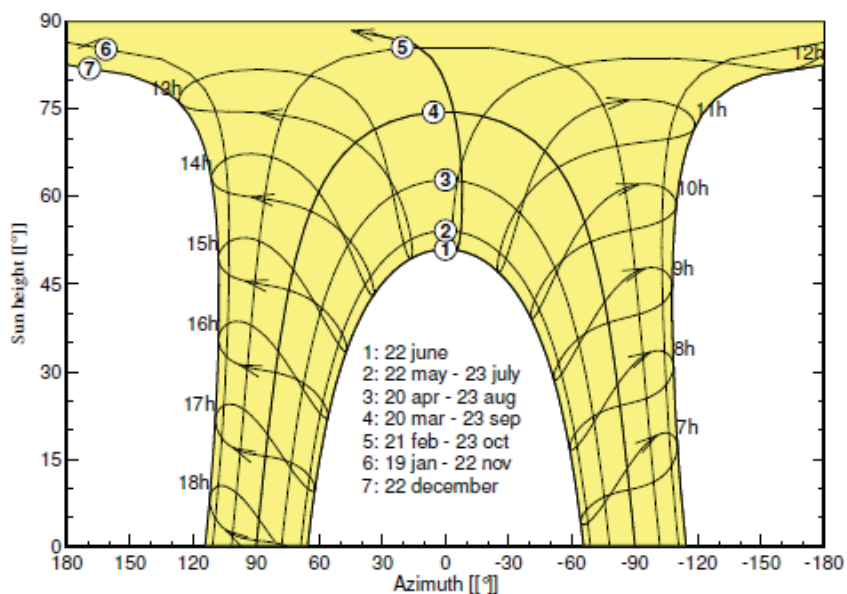
Tabela 19: Dados para a cidade de Brasília

Parâmetro	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média Anual
Irradiação global (kWh/m ² . dia)	5,35	5,83	5,50	5,16	4,84	5,01	5,30	5,91	6,09	5,28	4,78	4,96	5,33
Irradiação difusa (kWh/m ² . dia)	2,45	2,40	2,55	2,09	1,71	1,25	1,17	1,34	1,97	2,50	2,41	2,74	2,05
Temperatura (°C)	22,9	22,7	22,4	22,1	20,8	19,3	19,6	21,1	22,7	23,8	22,2	22,5	21,8

Fonte: Meteonorm 7.1

A Figura 69 representa o percurso solar em Brasília, a altura do sol e o azimute durante o ano.

Figura 69: Percurso solar para a cidade de Brasília



Fonte: Meteonorm 7.1

Os fatores de perda adotados nas simulações do sistema fotovoltaico no programa PVSyst constam na Tabela 20.

Tabela 20: Fatores de perda adotados na simulação

Detalhes das perdas	Valores
Fator de perda térmica	20 W/m ² . K
Perda ôhmica na fiação	1,5%
Perda na qualidade do módulo	2,5%
Perda <i>mismatch</i> do módulo	0,8%
Efeito do ângulo de incidência	0,05
Fator de degradação	0,4%
ISC dispersion RMS	0,4%
Voc dispersion RMS	0,4%
Fator de perda por sujeira	3,0%

Fonte: PVSyst, 2016

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Simulações térmicas e análise de Conforto Térmico

Após a modelagem da casa no *software Design Builder* de acordo com os parâmetros descritos no capítulo anterior, foram alternados os materiais de paredes internas e externas, e cobertura para gerar os resultados das simulações. Os resultados foram gerados para cada uma das quatro zonas térmicas (sala e cozinha, quarto 1, quarto 2, quarto 3), que representam os ambientes de longa permanência. Para a análise, foram utilizados os dados de temperatura operativa e temperatura do ar externa (bulbo seco). De acordo com a metodologia da ASHRAE-55 (2013) para avaliação do conforto térmico em ambientes naturalmente ventilados, as temperaturas operativas foram analisadas de acordo com a média da temperatura externa dos 7 dias anteriores.

Após determinar as temperaturas máximas e mínimas de aceitação para 80% dos usuários, avaliou-se o percentual de horas que se encontravam dentro e fora da zona de conforto¹². Para as horas que se encontram fora da zona de conforto (horas excedentes), foi calculado em quantos graus estas temperaturas excedem o limite máximo (calor) e mínimo (frio).

Para permitir uma comparação com as mesmas variáveis (orientação, área de cobertura, área de aberturas), os resultados foram agrupados por ambiente. Os dados estão classificados de acordo com os graus hora excedidos por calor em ordem crescente.

Comparando os ambientes “Quartos” entre si, nota-se que a orientação solar se reflete no número de graus hora excedidos por calor, já que o “Quarto 3” é aquele que tem abertura envidraçada protegida voltada para o Norte e paredes externa voltada para o Oeste. No entanto, apresenta resultados similares ao “Quarto 2”, que tem abertura envidraçada protegida voltada para Oeste. Já o “Quarto 1” é o ambiente que apresenta menores valores de graus

¹² Os gráficos de percentual de horas dentro os limites inferior e superior para 80% dos usuários de acordo com a norma ASHRAE 55 (2013) encontram-se no Apêndice I; os comparativos de percentual de horas dentro da zona de conforto encontram-se no Apêndice II; e os percentuais de horas de desconforto por frio e por calor encontram-se no Apêndice III.

hora excedidos por calor. Este ambiente tem abertura envidraçada protegida voltada para oeste, e parede externa exposta voltada para o sul.

Nota-se um escalonamento dos valores do gráfico da Figura 70. Ao analisarmos o primeiro grupo, formado por 4 combinações de paredes e coberturas, vemos que os materiais de cobertura "CLT + manta" e o "Laje Painel" combinados com as paredes "Painel Tijolo 140mm" e "Themopore" resultam nas combinações com menos quantidade de graus hora excedentes por calor. Analisando o último grupo, as combinações que ultrapassam os 4.000 graus hora excedentes por calor são compostas por seis combinações entre dois materiais de cobertura, as Isotelhas EPS e PUR, e três materiais de parede, o "Dry Wall 120mm", o "LDR 200mm" e o "Isofachada PUR".

Percebe-se que o ambiente "Sala" é o que apresenta os maiores valores de graus hora que excedem os limites superiores de temperatura, ou seja, que representam desconforto por calor aos usuários. Isto ocorre devido ao fato de que este é o ambiente com maior área de piso, e conseqüentemente com maior área de cobertura. Portanto, recebe radiação direta através da cobertura durante várias horas do dia, e uma vez que esta radiação é absorvida pelo material de cobertura, é transformada em carga térmica no interior do ambiente. Além disso, o fato de que bora part das aberturas envidraçadas deste ambiente estão voltadas para leste significa que o ambiente começa a receber carga térmica desde as primeiras horas do dia, e apesar de não receber insolação direta no período da tarde nas fachadas, recebe sol em toda a área de cobertura, como mencionado anteriormente. Este ambiente é também o que mais possui temperatura radiante, tanto dos usuários quanto dos equipamentos. Uma vez que a temperatura operativa interna leva a fração radiante dos equipamentos e dos usuários em conta, este é certamente um fator que influencia na alta quantidade de graus horas excedentes por calor no ambiente.

O Quarto 1, cujos resultados encontram-se na Figura 71, não recebe insolação direta na fachada voltada para o sul durante os meses de inverno, com temperaturas mais baixas. No entanto, o Quarto 1 tem maior área de cobertura, e, portanto, recebe maior carga térmica pela cobertura do que os Quartos 2 e 3. O quarto 1 também tem sua abertura envidraçada voltada para oeste, recebendo a carga térmica dos horários mais quentes durante toda a tarde. Estes fatores fazem com que o balanço térmico no interior do ambiente seja equilibrado, apresentando os menores valores de graus hora excedentes quando comparados aos outros ambientes.

Avaliando os grupos formados pelos resultados mais próximos, temos duas combinações que se aproximam dos mil graus hora excedentes por calor, e duas que ultrapassam este valor. As que ultrapassam são compostas por cobertura em Isotelha PUR e Isotelha EPS combinadas com paredes Dry Wall 120mm. Estas são também as duas combinações que apresentam valores de grau hora mais elevados em relação aos limites para o frio neste ambiente. Ainda em relação à quantidade de graus hora excedidos pelo frio, os materiais de parede “Dry Wall 120mm” e “Thermopore” apresentam os piores resultados.

O ambiente Quarto 2 é a única zona térmica analisada que possui apenas uma parede externa, as outras três são chamadas paredes internas por dividirem dois ambientes internos, e por não terem contato com o ar no exterior da casa. A área de cobertura do ambiente é igual à do Quarto 3, e a abertura envidraçada neste ambiente fica voltada para oeste, como no Quarto 1. Novamente o gráfico da Figura 72 apresenta resultados que podem ser agrupados com saltos marcados nas quantidades de graus hora excedentes. No caso do Quarto 2, nota-se seis combinações que excedem os 1.500 graus hora por calor, representados pelas combinações de telhas “Isotelha EPS e PUR” e paredes “Dry Wall 120mm”, e “LDR 200mm” e “Isofachada PUR”. Estas seis combinações são também as que apresentam maior quantidade de graus hora excedentes por frio, acrescida das combinações cobertura em CLT+manta ou Laje painel e parede Dry Wall 120mm.

Na zona térmica do quarto 3 (Figura 73), nota-se picos de percentuais de graus hora excedentes pelo frio. Apesar deste ser o ambiente com paredes expostas voltadas para a orientação norte e oeste, o que mais chama a atenção na análise de graus hora excedentes do Quarto 3 são os picos de graus hora excedentes pelo frio.

Os maiores valores resultam do uso de materiais isolantes para as paredes, como o Dry Wall (que tem isolamento térmico em lã de rocha), a Isofachada PUR e o painel Thermopore (que contém esferas de EPS). O fato deste ser o único ambiente com abertura envidraçada voltada para norte mostra que esta zona térmica demora mais a ser aquecida, pois apesar de receber insolação direta durante todo o dia, nos meses de inverno as temperaturas demoram mais a se elevar, atingindo seus picos apenas no período da tarde.

Portanto, para materiais de baixa inércia térmica, as baixas temperaturas da madrugada resfriam o ambiente de tal modo que ele só vai começar a se reaquecer no período da tarde. Este resultado demonstra também que as aberturas envidraçadas estão bem protegidas do sol, caso contrário este ambiente demonstraria nos resultados altos valores de graus hora excedentes por calor quando comparado ao ambiente Quarto 2, por exemplo.

Figura 70: Graus hora excedentes no ambiente "Sala"

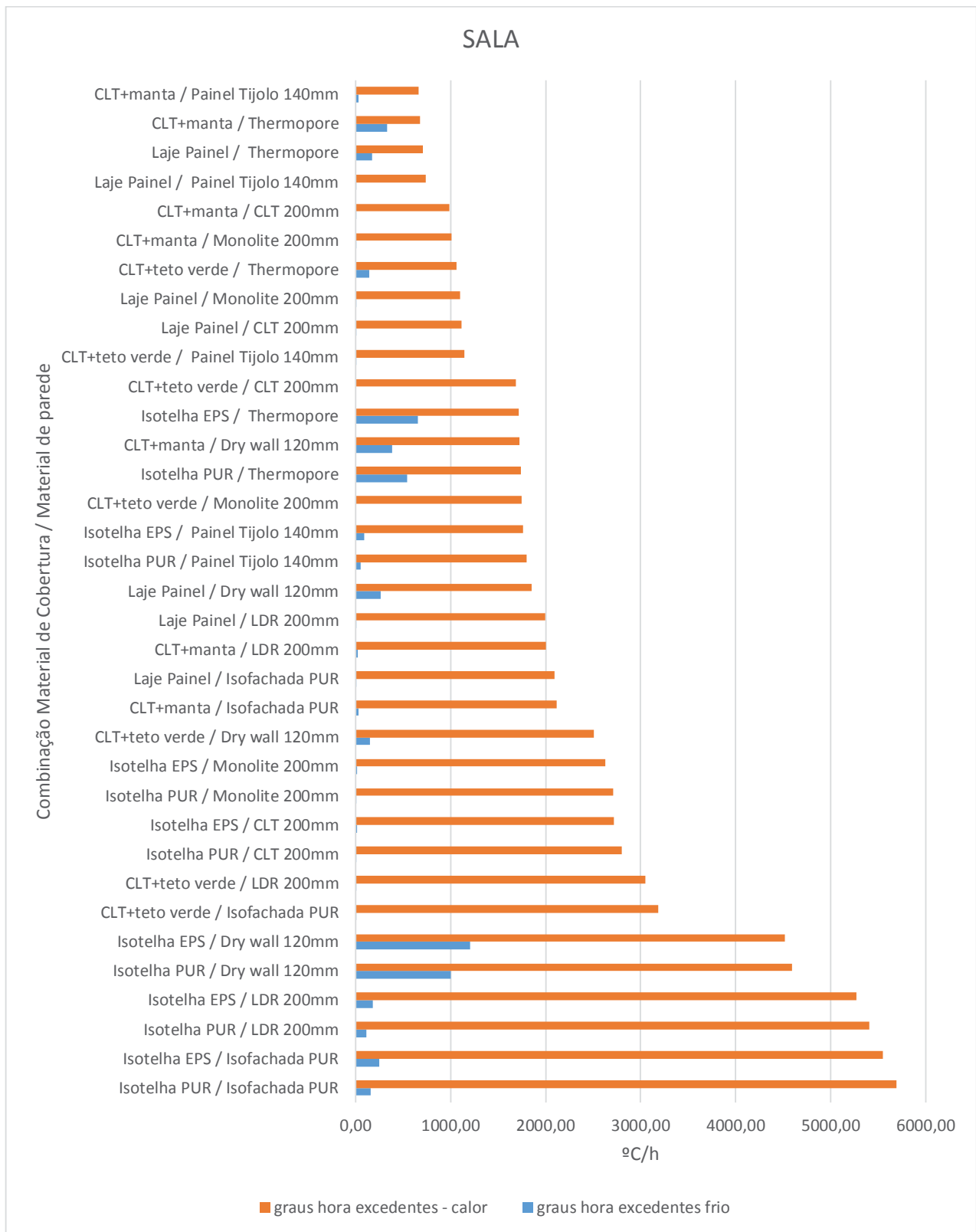


Figura 71: Graus hora excedentes no ambiente "Quarto 1"

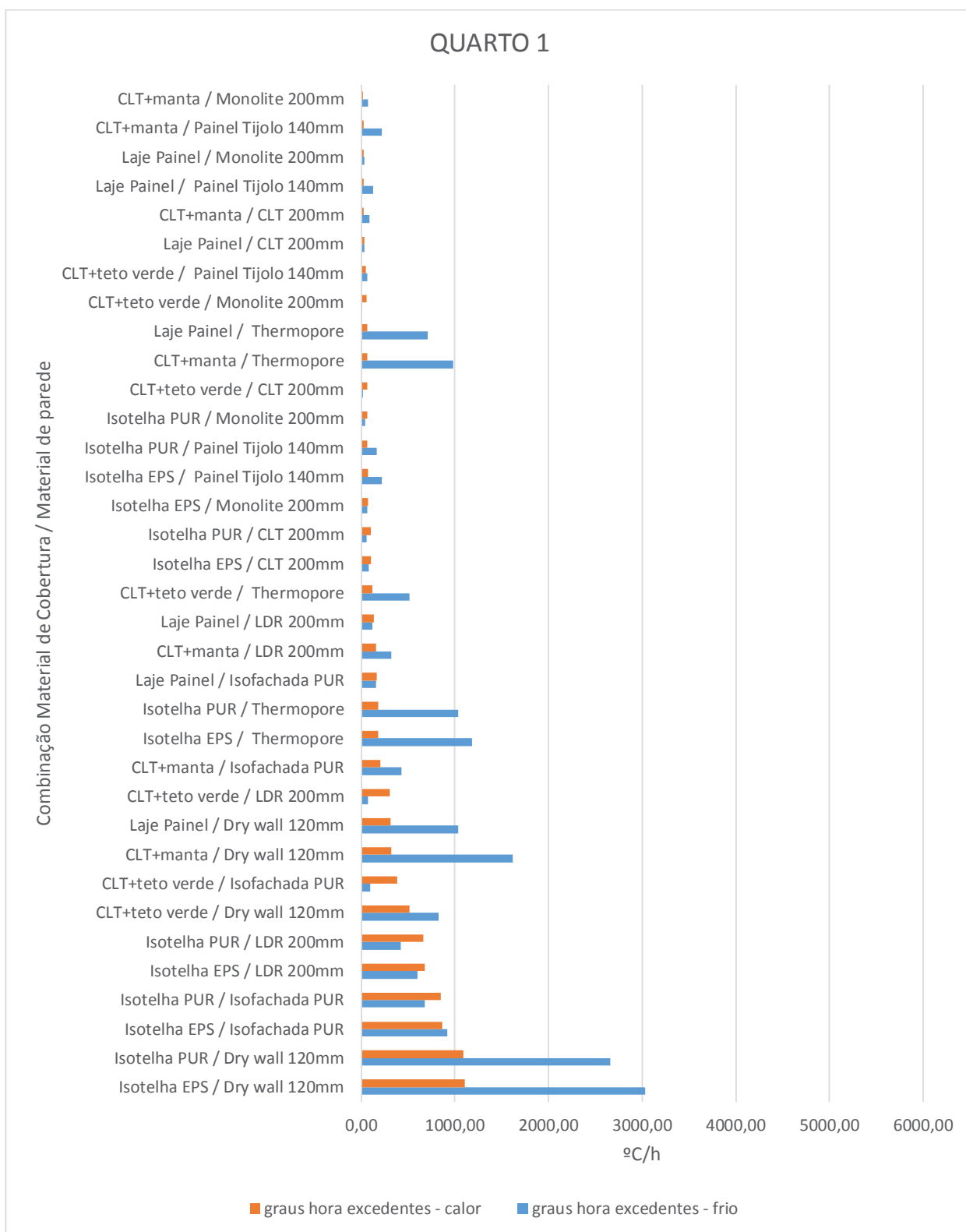


Figura 72: Graus hora excedentes no ambiente "Quarto 2"

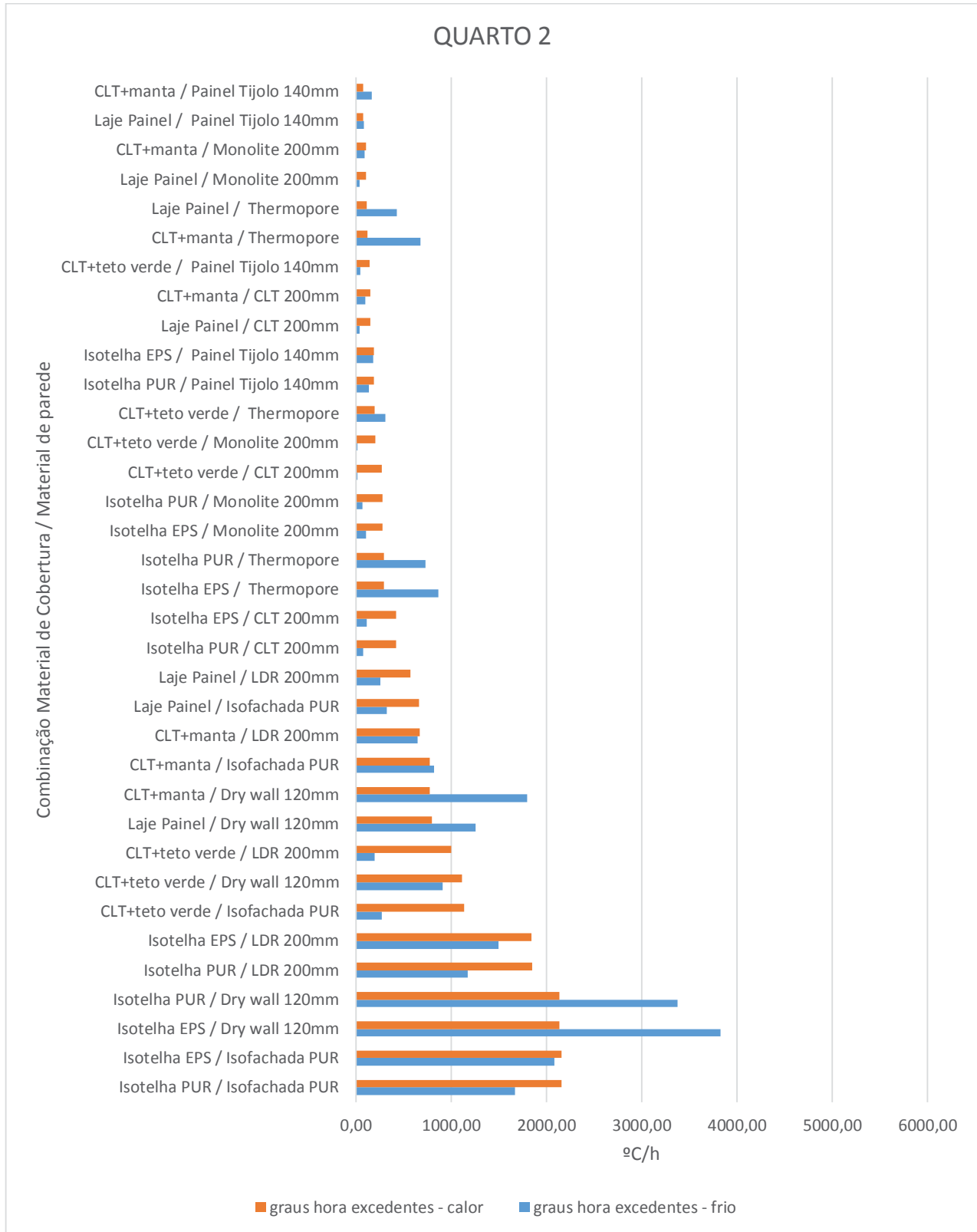
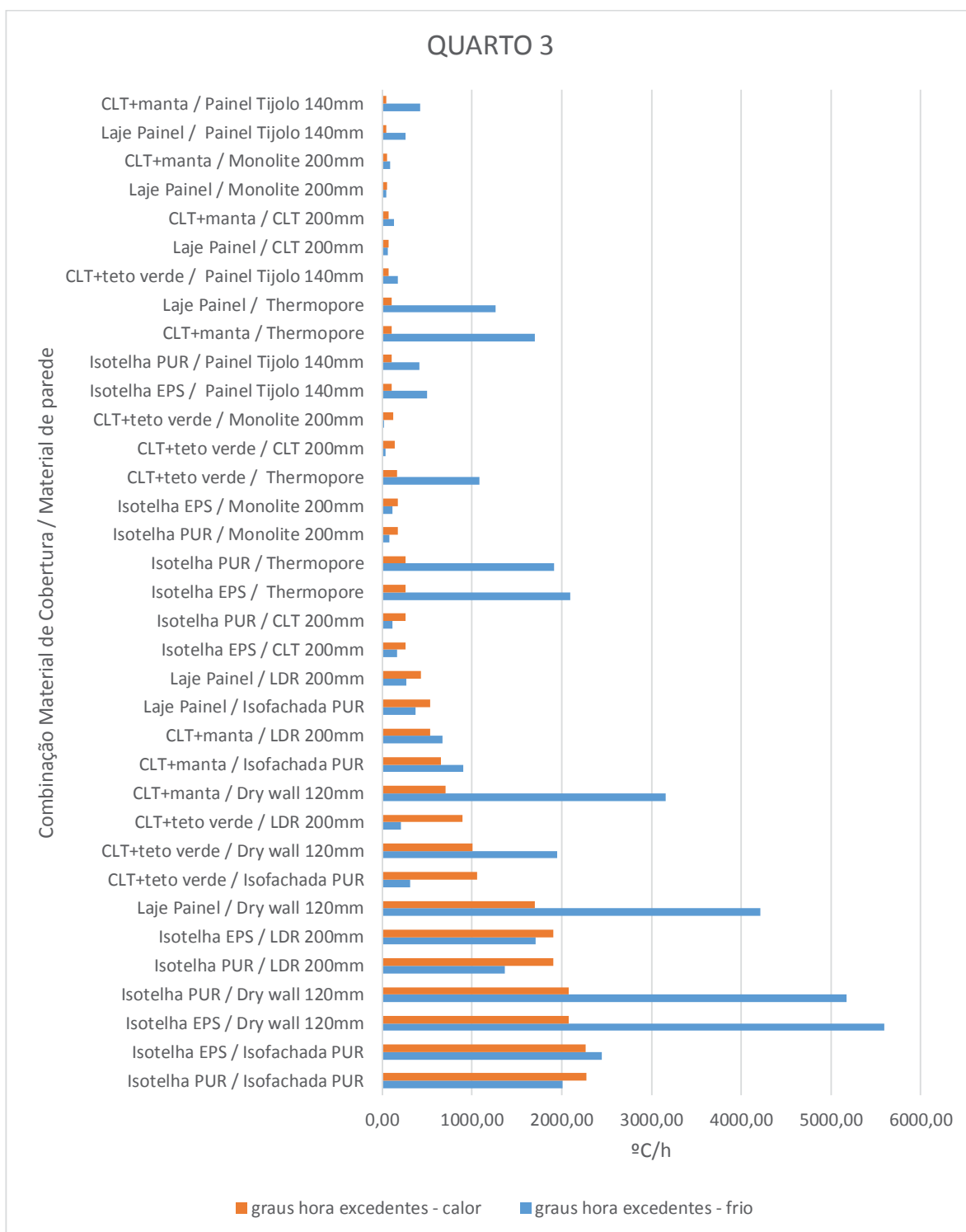


Figura 73: Graus hora excedentes no ambiente "Quarto 3"



5.1.1 Desconforto por calor

Analisando os cinco melhores resultados para os quatro ambientes, considerando os menores valores de graus hora excedentes para os limites superiores da zona de conforto, vemos que a combinação de cobertura em “CLT+manta” e paredes em “Painel de tijolos 140mm”, assim como a combinação de cobertura “Laje painel” e parede “Painel de tijolos 140mm”, estão presentes nos melhores resultados para todos os ambientes.

Já quando analisa-se os cinco piores resultados de todos os ambientes, ou seja, aqueles com o maior número de graus hora excedentes por calor, as cinco combinações são formadas por materiais isolantes, tanto na cobertura quanto nas paredes. Para três dos ambientes a combinação de cobertura “Isotelha PUR” e parede “Isofachada PUR” foi a que causou maior desconforto por calor. Percebe-se portanto que, para ambientes ventilados naturalmente, não é uma boa estratégia utilizar materiais isolantes nas paredes e cobertura.

5.1.2 Desconforto por frio

Para os graus hora de desconforto para o frio, nota-se que o material de parede “Dry wall 120mm” apresenta em todos os ambientes os piores graus de desconforto. Isso se dá pela baixa inércia térmica do material, que ao ser exposto a temperaturas mais baixas durante a noite faz com que o calor interno se dissipe. A combinação de cobertura “Isotelha EPS” e parede “Dry Wall 120mm” é a que apresenta os piores resultados para o frio.

Analisando as temperaturas operativas que ficaram abaixo do limite inferior de conforto, o material de parede Dry Wall gera inclusive temperaturas inferiores a 18oC. Este resultado pode inclusive significar a necessidade de condicionamento artificial do ar para aquecimento em determinadas épocas do ano.

5.2 Uso final de eletricidade da residência

Para a previsão de consumo energético da casa foram considerados equipamentos eficientes, e hábitos de uso destes equipamentos adequados. Parte importante do balanço energético nulo é a eficiência e uso consciente da energia elétrica pelos seus usuários.

5.2.1 Consumo energético fixo da residência

Como falado em capítulos anteriores, o conceito de balanço energético nulo adotado neste trabalho baseia-se em cálculos anuais de consumo e produção de energia elétrica. Considera-se consumo fixo aquele estimado para os equipamentos eletrodomésticos e eletrônicos, e o sistema de iluminação artificial da casa.

Portanto, para o cálculo da previsão de consumo mensal de equipamentos por 12 meses da casa serão considerados os parâmetros de uso e potência de equipamentos descritos no capítulo de metodologia. O consumo mensal por equipamentos considerado fixo da residência será de 333,9 kWh. O consumo anual por equipamentos é de 4006,8kWh.

Tabela 21: Estimativa do consumo de energia elétrica dos equipamentos

Ambiente	Equipamento	Fração radiante	Potência (Watts)	Período (horas diárias)	Potência mensal total (Wh)
Cozinha	Geladeira	0,5	85,0	24	61.200
Cozinha	Cooktop indução	0,5	7.200,0	0,5	108.000
Cozinha	Forno	0,5	2.500,0	0,5	37.500
Cozinha	Diversos	0,5	50,0	2	3.000
Cozinha	Lava louças	0,5	1.500,0	1	45.000
Lavanderia	Lava e seca	0,5	1.500,0	0,42	18.900
Sala	Televisor	0,5	120,0	8	28.800
Quarto 1	Diversos	0,5	50,0	2	3.000
Quarto 2	Computador	0,5	250,0	3	22.500
Quarto 2	Diversos	0,5	50,0	2	3.000
Quarto 3	Diversos	0,5	50,0	2	3.000
Total mensal (kWh):					333,9

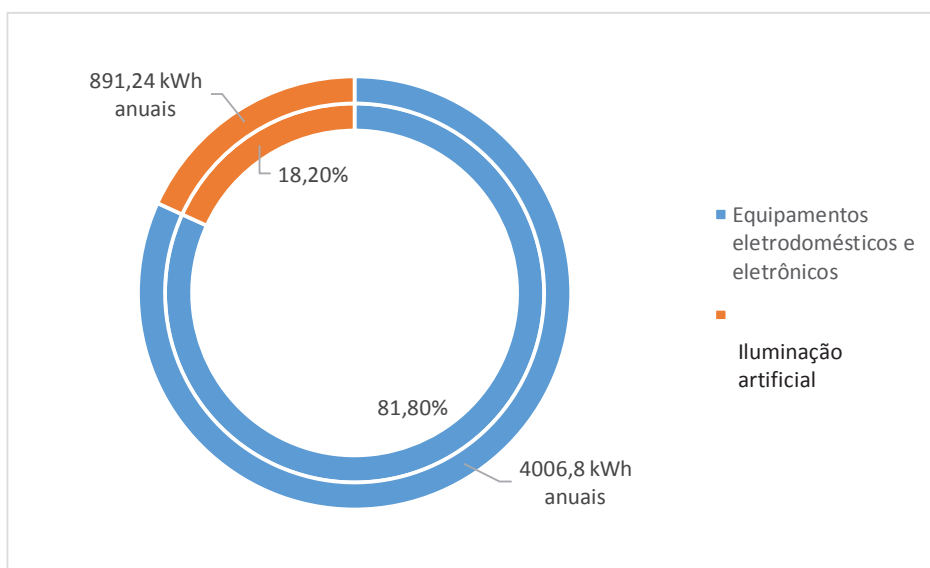
O sistema de iluminação artificial instalado na casa é todo feito por luminárias LED, com potência média instalada de 5W/m². Considerando o padrão de uso da iluminação artificial e as áreas de cada ambiente, calcula-se o consumo diário da residência.

Tabela 22: Estimativa do Consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial

Ambiente	Área (m²)	Horas de uso diárias	Total diário por ambiente (W)
Sala e Cozinha	47,75	8h	1910
Quarto 1	15,75	3h	236,25
Quarto 2	9,85	3h	147,75
Quarto 3	9,85	3h	147,75
Total diário			2441,75

O consumo mensal¹³ relativo ao sistema de iluminação artificial da residência é portanto de 74,27 kWh, ou seja 891,24kWh anuais. O valor mensal somado aos 333,9 kWh mensais relativos ao uso de equipamentos e eletrodomésticos totalizam 408,17 kWh mensais. Fazendo uma comparação relativa a estes consumos, a Figura 74 mostra que, ao desconsiderarmos o condicionamento artificial, o consumo nesta tipologia relacionado aos equipamentos eletrodomésticos, e eletrônicos representam 81,80% do total, e a iluminação artificial representa 18,20% do consumo total.

Figura 74: Consumo de energia elétrica fixo na casa



O consumo anual¹⁴, portanto, é de 4898,04 kWh, e considerando a área da residência de 108m², temos 45,35 kwh/m²/ano. Podemos ainda considerar o consumo mensal por pessoa de 102kWh.

5.2.2 Consumo energético do sistema de climatização artificial

Como vimos no item das simulações térmicas e análise de conforto térmico dos usuários, de acordo com os parâmetros da norma ASHRAE 55 (2013) para o conforto adaptativo para ambientes naturalmente ventilados controlados pelo usuário, nenhuma das combinações de parede e cobertura se encaixaram na zona de conforto aceitável para 80% dos usuários para

¹³ Para o cálculo do consumo mensal considerou-se o valor diário multiplicado por 365 e dividido por 12.

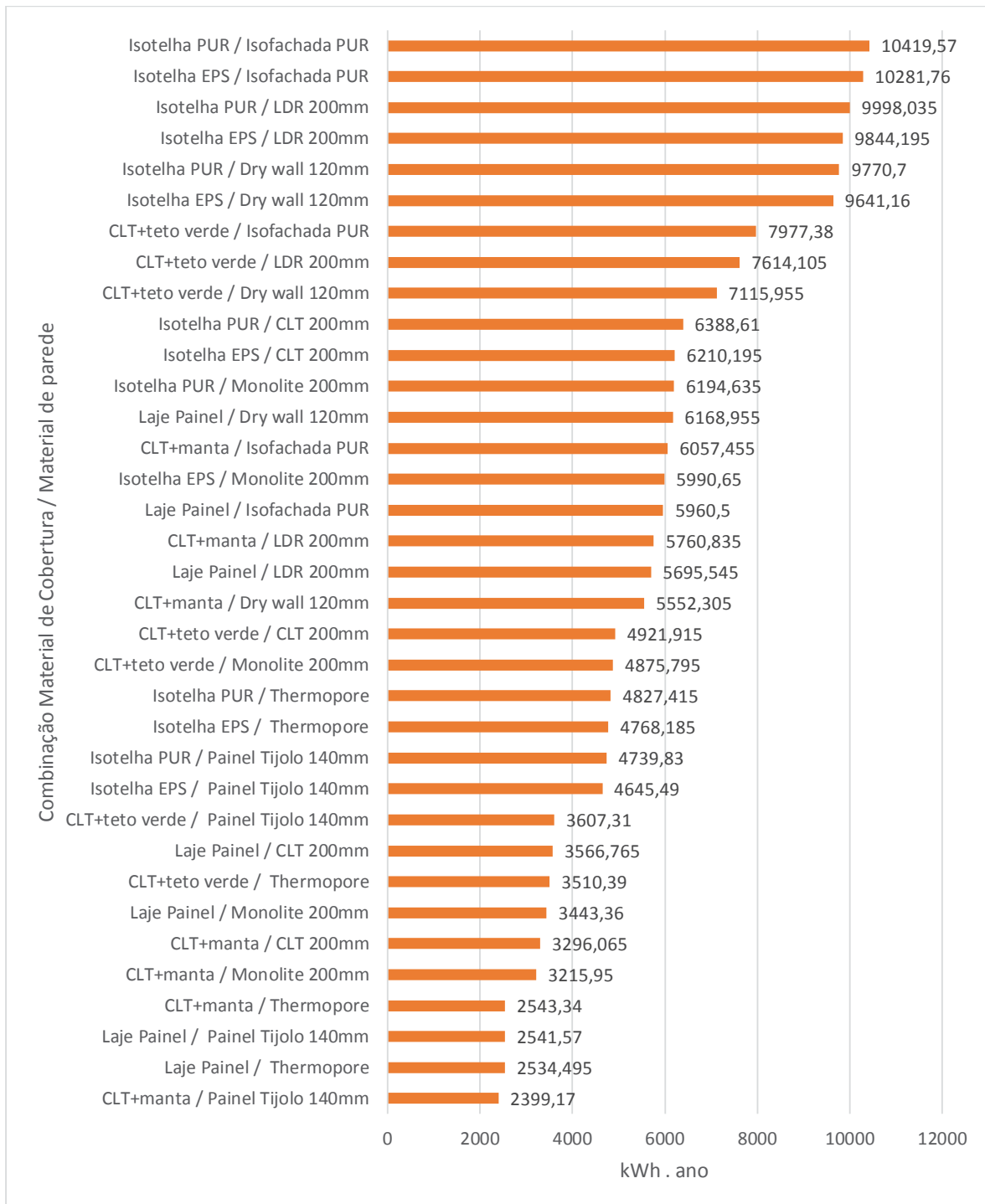
¹⁴ Para o cálculo do consumo anual foi considerada a somatória de consumo mensal multiplicada por 12 meses.

todas as horas do ano. Para garantir o conforto térmico dos usuários, foi necessário, portanto estimar o consumo de energia elétrica resultante do sistema de condicionamento artificial de ar para resfriamento das temperaturas internas quando estas ultrapassassem o limite superior de aceitabilidade proposto pela norma.

Para esta estimativa foi considerada a potência de cada aparelho, determinada anteriormente de acordo com as características e área do ambiente, e levando em conta a quantidade de horas do ano em que cada ambiente apresentou temperaturas operativas acima dos limites superiores de conforto, ou seja, desconforto por calor. Os resultados serão apresentados para cada combinação, com as cargas separadas por ambiente¹⁵, e em seguida, os valores são somados gerando um valor de consumo anual para a casa toda. A Figura 75 apresenta um resumo do consumo energético (kWh) por ar-condicionado ao longo do ano para cada combinação de materiais, em ordem crescente em relação ao consumo.

¹⁵ Para os cálculos individuais por ambiente ver Apêndice IV.

Figura 75: Estimativa simplificada do consumo de energia elétrica do ar condicionado para cada combinação de cobertura e parede estudadas



5.2.3 Consumo energético total

Somando os valores de consumo de energia elétrica por equipamentos e iluminação (valores fixos) e os valores de consumo de energia elétrica dispensados na climatização artificial da casa (variável de acordo com o desempenho de conforto térmico para cada combinação de materiais), temos um panorama mais completo dos dados de consumo da casa. Pode-se então comparar caso a caso, e identificar os percentuais de consumo energético atribuídos a cada uso.

A Figura 76 traz este comparativo mostrando em amarelo o consumo energético gerado pelo uso de equipamentos eletrodomésticos e eletrônicos, e em azul, o consumo energético gerado pelo uso do sistema de iluminação artificial. Estes dois valores de consumos são os mesmos para todas as combinações de materiais. Em laranja, vemos a variação no consumo, de acordo com o consumo de energia elétrica gerado pelo condicionamento artificial da casa, que varia para cada combinação em função da diferença de horas de desconforto por calor que cada uma apresentou nas simulações térmicas dos ambientes.

A combinação de materiais de parede e cobertura que se mostrou mais eficiente foi a de cobertura em placa de CLT (*Cross Laminated Timber*) com 200mm de espessura e paredes em Paineis de Tijolos Cerâmicos de 140mm de espessura. Para esta combinação a casa apresentou um consumo anual de 7297 kWh, ou seja, 67,56 kWh/m² ao ano.

A combinação que se mostrou menos eficiente foi a de cobertura em Isotelha PUR de 100mm de espessura e paredes em Isofachada PUR de 100mm de espessura. Para esta combinação, a mesma casa apresentou um consumo anual de 15317,61 kWh, equivalentes a 141,83 kWh/m² ao ano.

A diferença entre o menor e o maior consumo total vai de 7.297 kWh anuais até 15.317 kWh anuais. Quando analisados caso a caso, o percentual de consumo energético relativo ao condicionamento artificial do ar varia entre 32,88% e 68,02%, conforme a Tabela 23. Ou seja, o consumo energético total chega a ser maior em mais que o dobro em função da especificação dos materiais opacos para a envoltória.

Figura 76: Consumo energético total para cada combinação simulada

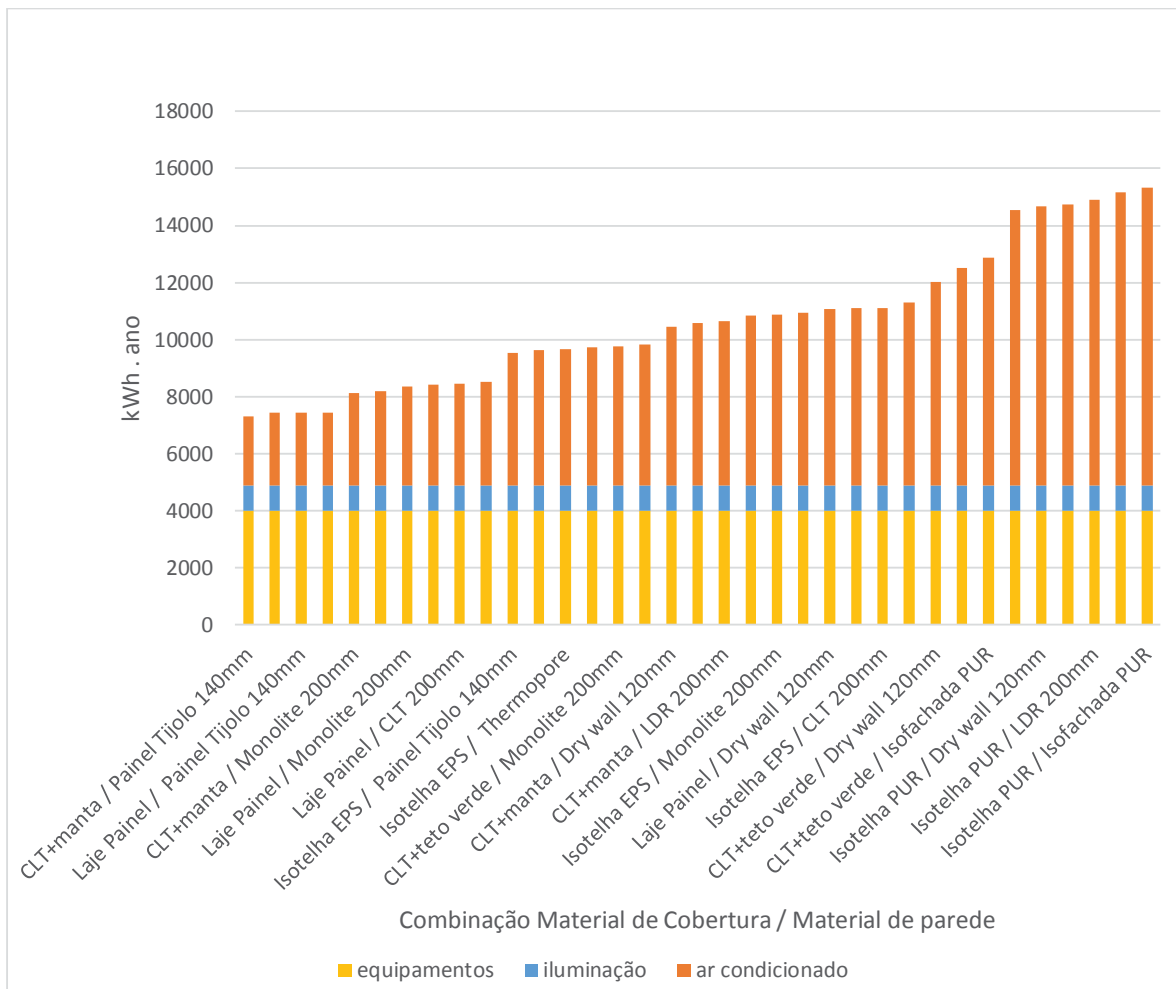


Tabela 23: Percentuais de consumo energético

Combinação material de cobertura / material de parede	percentual equipamentos	percentual iluminação	percentual ar cond.
CLT+manta / Painei Tijolo 140mm	54,91%	12,21%	32,88%
Laje Painei / Thermopore	53,91%	11,99%	34,10%
Laje Painei / Painei Tijolo 140mm	53,86%	11,98%	34,16%
CLT+manta / Thermopore	53,84%	11,98%	34,18%
CLT+manta / Monolite 200mm	49,38%	10,98%	39,63%
CLT+manta / CLT 200mm	48,90%	10,88%	40,22%
Laje Painei / Monolite 200mm	48,04%	10,68%	41,28%
CLT+teto verde / Thermopore	47,65%	10,60%	41,75%
Laje Painei / CLT 200mm	47,33%	10,53%	42,14%
CLT+teto verde / Painei Tijolo 140mm	47,11%	10,48%	42,41%
Isotelha EPS / Painei Tijolo 140mm	41,98%	9,34%	48,68%
Isotelha PUR / Painei Tijolo 140mm	41,57%	9,25%	49,18%
Isotelha EPS / Thermopore	41,45%	9,22%	49,33%
Isotelha PUR / Thermopore	41,20%	9,16%	49,64%
CLT+teto verde / Monolite 200mm	41,00%	9,12%	49,89%
CLT+teto verde / CLT 200mm	40,80%	9,08%	50,12%
CLT+manta / Dry wall 120mm	38,34%	8,53%	53,13%
Laje Painei / LDR 200mm	37,82%	8,41%	53,76%
CLT+manta / LDR 200mm	37,59%	8,36%	54,05%
Laje Painei / Isofachada PUR	36,90%	8,21%	54,89%
Isotelha EPS / Monolite 200mm	36,80%	8,19%	55,02%
CLT+manta / Isofachada PUR	36,57%	8,14%	55,29%
Laje Painei / Dry wall 120mm	36,20%	8,05%	55,74%
Isotelha PUR / Monolite 200mm	36,12%	8,03%	55,84%
Isotelha EPS / CLT 200mm	36,07%	8,02%	55,91%
Isotelha PUR / CLT 200mm	35,50%	7,90%	56,60%
CLT+teto verde / Dry wall 120mm	33,35%	7,42%	59,23%
CLT+teto verde / LDR 200mm	32,02%	7,12%	60,85%
CLT+teto verde / Isofachada PUR	31,12%	6,92%	61,96%
Isotelha EPS / Dry wall 120mm	27,56%	6,13%	66,31%
Isotelha PUR / Dry wall 120mm	27,32%	6,08%	66,61%
Isotelha EPS / LDR 200mm	27,18%	6,05%	66,78%
Isotelha PUR / LDR 200mm	26,90%	5,98%	67,12%
Isotelha EPS / Isofachada PUR	26,40%	5,87%	67,73%
Isotelha PUR / Isofachada PUR	26,16%	5,82%	68,02%

Comparando os percentuais de consumo relativos ao ar condicionado entre o valor mais baixo e o valor mais alto, a Figura 77 e a Figura 78 mostram o quanto a especificação de materiais de construção pode influenciar na variação do consumo de energia elétrica da casa pré fabricada analisada.

Figura 77: Percentuais de consumo de energia elétrica na combinação CLT+manta / Paineis Tijolo 140mm

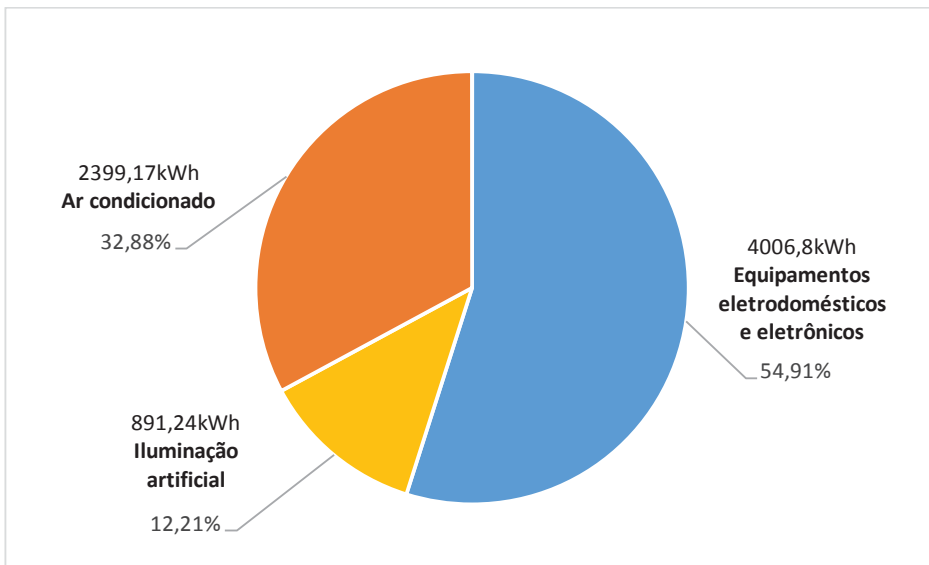
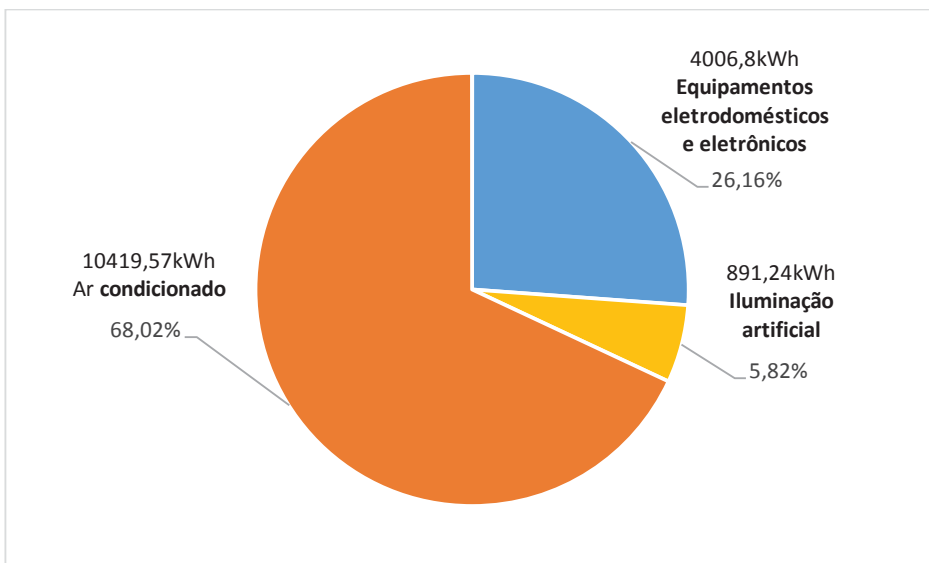


Figura 78: Percentuais de consumo de energia elétrica na combinação Isotelha PUR / Isofachada PUR



5.3 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

Os resultados obtidos através da simulação com o *software PVsyst* versão 6.2.2 mostram a potência produzida pelo sistema de placas fotovoltaicas ao dia em cada mês, e os totais mensais. A Tabela 24 mostra os resultados da simulação.

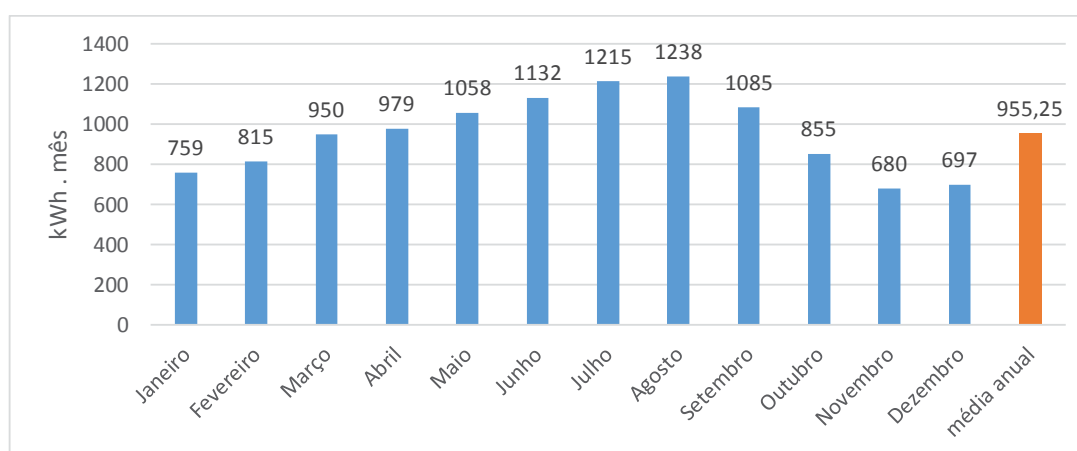
Tabela 24: Dados de saída da simulação do sistema fotovoltaico

	Global horizontal (kWh/m ² . dia)	Plano dos coletores (kWh/m ² . dia)	Produção do sistema (kWh/dia)	Produção do sistema (kWh)
Janeiro	5,35	4,42	24,50	759
Fevereiro	5,83	5,25	29,11	815
Março	5,50	5,52	30,64	950
Abril	5,16	5,89	32,64	979
Mai	4,84	6,15	34,12	1058
Junho	5,01	6,80	37,73	1132
Julho	5,29	7,07	39,19	1215
Agosto	5,90	7,20	39,95	1238
Setembro	6,09	6,52	36,15	1085
Outubro	5,28	4,97	27,59	855
Novembro	4,78	4,08	22,66	680
Dezembro	4,96	4,05	22,47	697
Ano	5,33	5,66	31,40	11463

Fonte: PVsyst 6.6.2

Os totais mensais de produção do sistema são representados na Figura 79. É possível verificar no gráfico que os valores de radiação solar são mais altos nos meses de junho a setembro, e isso se reflete na maior produção de energia nestes meses.

Figura 79: Dados de saída do sistema de produção mensal



Fonte: PVsyst 6.6.2

5.4 Análise e interpretação dos resultados

A compreensão do comportamento e influência de cada uma das decisões de projeto é de extrema importância para o desempenho térmico e conforto do usuário nos ambientes internos de uma edificação. Tendo algumas variáveis de projeto fixas (orientação, porosidade, percentual de aberturas, proteção de aberturas, fator solar dos vidros), foi possível identificar como e quanto cada uma das variáveis relacionadas aos materiais de paredes e coberturas influenciam nos índices de conforto adaptativo e no consumo energético da casa pré fabricada analisada.

A avaliação de conforto térmico baseou-se na norma ASHRAE 55 - 2013 por ser uma norma que se aplica a ambientes naturalmente ventilados, e que trata do conceito de conforto adaptativo. Apesar de abordar conceitos atuais e completos em relação ao conforto térmico dos usuários em ambientes internos, a norma não apresenta gradações, ou possibilidades de atendimento parcial às condições de conforto. Para o projeto avaliado, nenhuma das combinações satisfaz plenamente (com 100% das horas) o limite normativo de 80% dos usuários satisfeitos. No entanto, é importante lembrar que, por se tratar de casas pré-fabricadas que podem ser construídas em vários terrenos e várias orientações solares diferentes, a casa considerada para as simulações térmicas foi posicionada de modo a ter as fachadas com maior percentual de aberturas envidraçadas para norte e oeste, podendo ser considerada como a pior situação de orientação. Para as demais orientações possíveis, pode ser que a casa apresente melhores resultados em relação aos percentuais de horas dentro da zona de conforto adaptativo.

O conceito de grau hora excedente, tanto para resfriamento ou para aquecimento, é um parâmetro interessante que permite comparar as várias combinações. No entanto, esta avaliação só é válida quando se comparam os mesmos ambientes, de modo que tenham variáveis fixas como a orientação solar, área de piso e de cobertura, percentual de aberturas na fachada, porosidade quanto à ventilação, dentre outros fatores.

Nota-se um número de horas expressivo que ultrapassa os limites inferiores da zona de conforto adaptativo, ou seja, horas de desconforto por frio. Estas horas ocorrem principalmente nas madrugadas, e nos ambientes com vedações opacas voltadas para o sul. Estes resultados comprovam a importância da estratégia de inércia térmica para o clima de Brasília, que principalmente no período da seca contribui com que as temperaturas internas tenham amplitude menor que as externas. Percebe-se que as aberturas voltadas para norte (Quarto 3) está bem sombreada, mas isso faz com que as horas de frio sejam prolongadas no período do

inverno, para o uso de materiais isolantes nas paredes. Já as aberturas voltadas para oeste (quartos 1 e 2) não estão tão bem sombreadas, mas fazem com que o balanço térmico no inverno seja melhor equilibrado.

Para as horas que excederam os limites superiores optou-se por estimar a correção do conforto térmico dos usuários através do uso do ar condicionado, que seria a pior situação do ponto de vista do consumo energético. Analisando o consumo energético da residência percebe-se que mesmo para as combinações de materiais que necessitam de ar condicionado para climatização artificial por menos tempo durante o ano, a carga de consumo energético é bastante elevada, representado aproximadamente 40% a mais da energia consumida usualmente com os demais equipamentos eletrodomésticos e eletrônicos da casa.

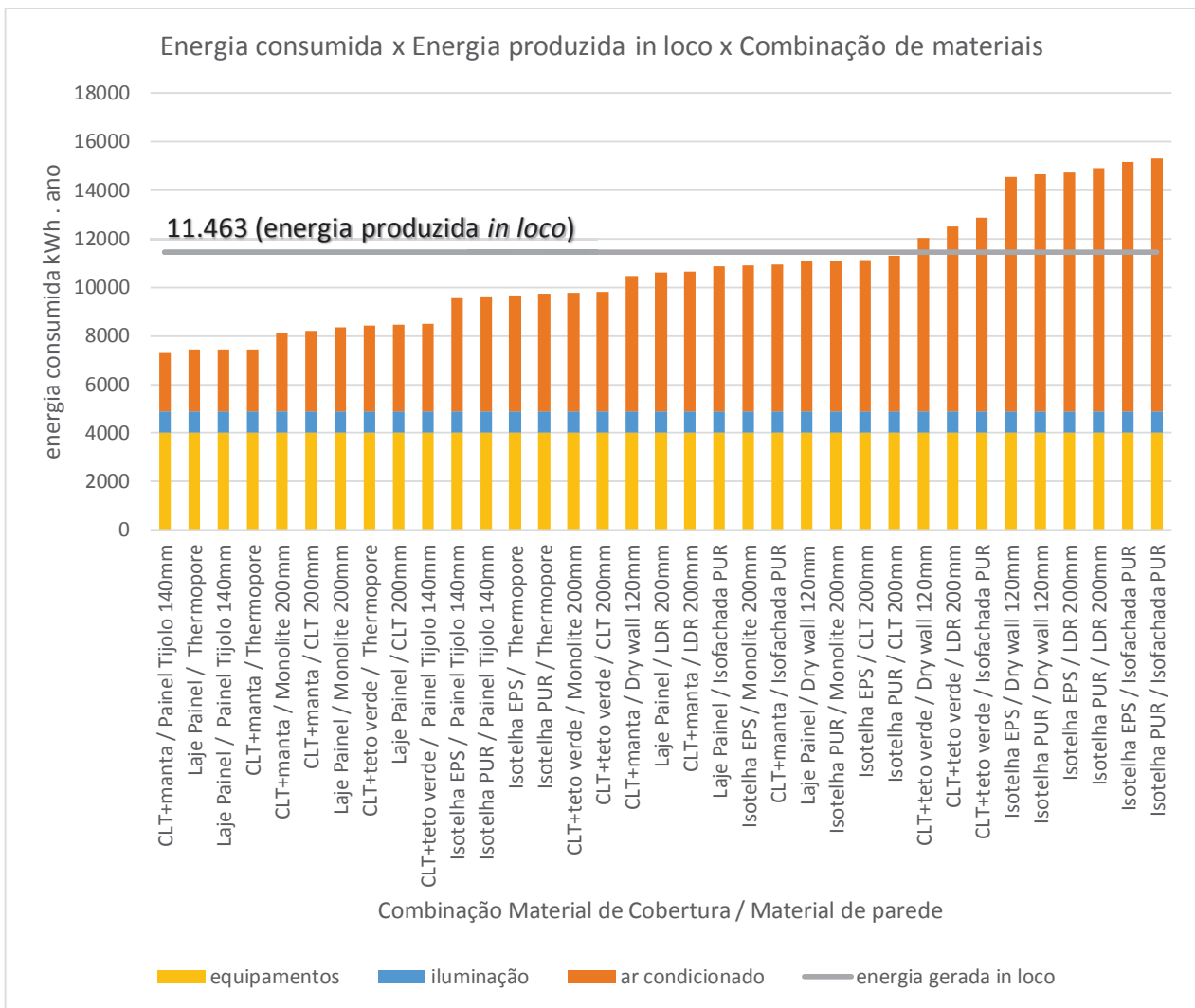
De modo geral percebe-se que para cada material utilizado as estratégias em relação às aberturas podem ser diferentes de modo a gerar balanços térmicos diferentes. Para materiais isolantes ou com baixa inércia térmica deve-se posicionar as aberturas envidraçadas para leste de modo a esquentar o quanto antes o ambiente e elevar as temperaturas internas no inverno. E assim durante a tarde as paredes opacas isolantes isolam o calor externo. Para materiais com maior inércia térmica as aberturas devem ser protegidas de modo a não deixar o sol entrar nas horas mais quentes, ou o calor não sairá.

Temos por fim o resultado de energia elétrica produzida através das placas fotovoltaicas ao longo do ano. Ao analisar uma comparação entre a energia elétrica produzida na casa e a energia elétrica consumida em cada uma das combinações de materiais de parede e cobertura, podemos verificar quais destas combinações poderia resultar em uma casa de balanço energético nulo, e em quais delas não seria possível alcançar este resultado.

A escolha dos materiais opacos de parede e cobertura impactam significativamente nos níveis de conforto térmico dos usuários da casa, e conseqüentemente, impactam no consumo energético. Por sua vez, o consumo energético impacta no dimensionamento e na viabilidade do sistema de produção de energia fotovoltaica. Percebe-se que para algumas combinações de materiais a quantidade de placas poderia até mesmo ser diminuída, resultando em uma maior viabilidade econômica do projeto. A energia excedente poderia ser usada também para carregar carros elétricos, tecnologia emergente, que faz muito sentido quando se fala de condomínios residenciais em locais afastados do centro da cidade, em que os moradores têm que percorrer longas distâncias diariamente.

A Figura 80 traz este comparativo mostrando em amarelo o consumo energético gerado pelo uso de equipamentos eletrodoméstico e equipamentos eletrônicos, e em azul, o consumo energético gerado pelo uso do sistema de iluminação artificial. Estes dois valores de consumos são os mesmos para todas as combinações de materiais. Em laranja, vemos a variação no consumo, de acordo com o consumo de energia elétrica gerado pelo condicionamento artificial da casa, que varia para cada combinação em função da diferença de horas de desconforto por calor que cada uma apresentou nas simulações térmicas dos ambientes. A linha cinza por sua vez representa a produção de energia elétrica in loco através do sistema de placas fotovoltaicas. Este dado também é constante para todas as alternativas de combinações de materiais.

Figura 80: Comparativo dos totais anuais entre energia elétrica consumida em cada combinação de materiais e a energia produzida por placas fotovoltaicas



A Figura 80 mostra que para as combinações que ultrapassam a linha cinza, que é a constante do valor de energia elétrica produzida, não foi possível alcançar o balanço energético nulo. De um total de 35 combinações de materiais, temos 9 que não podem ser consideradas adequadas para alcançar resultados de consumo energético inferior ao da produção de eletricidade através dos painéis fotovoltaicos para o clima de Brasília.

Das 26 combinações que poderiam ser consideradas passíveis de atingir o balanço energético nulo, nota-se um escalonamento que agrupa algumas combinações. As quatro primeiras combinações têm seu consumo de energia elétrica anual girando em torno de 7300 e 7400 kWh ao ano. O grupo seguinte gira em torno dos 8000kWh ao ano, e o próximo grupo (que representa a maior parte das combinações) tem consumo anual aproximado de 10.000kWh.

Os resultados obtidos na simulação de produção de energia elétrica fotovoltaica mostram que em 26 combinações é possível atender a demanda de eletricidade da residência unifamiliar estudada, com um sistema de placas fotovoltaicas instalados em parte da cobertura da edificação. Atualmente as Resoluções normativas 482 e 687 (ANEEL, 2012; 2015) não permitem a comercialização da energia elétrica excedente produzida in loco, mas para estas combinações de materiais em que a produção fotovoltaica excede os valores de consumo, seria possível também que a energia gerada fosse utilizada para outras finalidades, como para a recarga de carros elétricos, que são uma tecnologia emergente já adotada por alguns moradores da região. Ou até mesmo contribuir para a iluminação pública do condomínio, caso houvesse uma interligação entre as várias casas e a infraestrutura comum do condomínio.

Outra possibilidade para estas 26 combinações seria reduzir o número de placas fotovoltaicas, ação esta que teria impacto direto no custo da casa. Apesar da variável "custo de implantação" não ter sido abordada neste trabalho, sabe-se que a viabilidade econômica é importante para a concretização de soluções construtivas.

Para as 35 combinações de materiais estudadas neste trabalho, temos 9 que não atingem o balanço energético nulo, pelo fato de apresentarem os mais altos valores de horas que ultrapassam o limite superior de conforto. Dez das combinações apresentam valores de consumo energético muito próximo do valor simulado para geração de energia, e podem, portanto, ser consideradas casas de balanço energético nulo. E dezesseis das combinações, apesar de não se encaixarem totalmente dentro da zona de conforto adaptativo para a cidade de Brasília, apresentaram um número menor de horas excedentes por calor, resultando em um consumo energético mais baixo. Estas podem ser consideradas como casas de balanço energético positivo, pois produzem aproximadamente 30% mais energia do que consomem

durante o período de um ano. Destas dezesseis, quatro se destacam por ter o consumo ainda mais baixo, podendo ser consideradas as combinações mais adequadas às casas pré-fabricadas de balanço energético positivo: Cobertura em painel CLT e parede em painel de tijolos cerâmicos; cobertura em laje painel e paredes em painéis Thermopore; cobertura em laje painel e paredes de painel de tijolos cerâmicos; e cobertura em painéis CLT e paredes em painel Thermopore. Temos finalmente dois materiais mais adequados para a cobertura (painel CLT e laje painel) e dois materiais de parede (painel Thermopore e painel de tijolos cerâmicos), que combinados entre si, representam os melhores resultados considerando-se o consumo energético final da casa.

5.5 Diretrizes de projeto para casas pré fabricadas de balanço energético nulo em Brasília

A partir da revisão de literatura e da metodologia de avaliação de projeto adotada neste trabalho, foram identificadas algumas diretrizes de projeto para casas pré fabricadas de balanço energético nulo em Brasília. O sucesso destas diretrizes está ligado à definição do clima do local onde a casa será implantada, e às estratégias bioclimáticas pré definidas para este local. O projeto desenvolvido para este trabalho levou em consideração as diretrizes abaixo, e foi um importante exercício na definição de algumas delas.

As estratégias bioclimáticas para cada localidade podem ser encontradas na NBR 15220-3 (ABNT, 2005). É importante levar em conta as estratégias propostas pela norma como um todo, pois são agrupadas e combinadas, levando em conta muitas variáveis de projeto, como propriedades térmicas de materiais de parede e cobertura, proteção solar de aberturas, orientação solar da edificação, percentual de aberturas para ventilação, dentre outros.

As casas pré fabricadas podem oferecer conforto térmico e pouco uso de energia desde que sejam pensadas de modo particular para diferentes localidades e orientações solares. É possível alcançar projetos ao mesmo tempo padronizados e diferenciados através de construções modulares que tenham diretrizes para cada orientação e localidade. Um estudo de simulações termo-energéticas deve estar por trás destas estratégias, e a possibilidade de customização e adaptação a diferentes climas pode ser facilitada pelo uso da tecnologia.

Uma mesma casa pode ter um ótimo desempenho para determinada localidade, e um péssimo desempenho para uma outra, pois as estratégias bioclimáticas mudam de acordo com o clima do local. A customização passa assim a servir não apenas como um meio de personificação da

casa pré fabricada, mas também passa a ser uma importante ferramenta para possibilitar o bom desempenho térmico e energético de um mesmo princípio norteador de projeto para várias localidades.

5.5.1. Implantação no terreno e orientação solar

A orientação solar irá influenciar nos ganhos térmicos, na ventilação natural, na posição e eficiência das placas solares de aquecimento da água e das placas fotovoltaicas, por isso é importante que o projeto considere a orientação solar real da casa, de acordo com sua implantação no terreno. Caso a orientação solar não esteja definida, deve-se considerar o pior caso, ou seja, no caso de Brasília, a fachada com maior percentual de aberturas envidraçadas deve estar voltada para noroeste.

5.5.2. Área interna e compacidade da casa

Tendo em vista a possibilidade de oferecer casas customizáveis, o projeto de uma casa pré fabricada deve ser pensado de forma modular, em que seja possível adicionar (ou subtrair) cômodos sem alterar a essência funcional da casa. Quanto à forma e compacidade, a casa térrea oferece maior área de cobertura para a instalação de sistemas de geração de energia, no entanto, áreas de cobertura maiores acabam por aumentar os ganhos térmicos nos ambientes internos.

5.5.3. Sistema construtivo

O sistema construtivo proposto deve oferecer a possibilidade de ser dissociado dos materiais de vedação. O ideal é que as peças não ultrapassem a largura de 3 metros e 12 metros de comprimento para que possam ser transportadas em caminhões da indústria até o seu destino final.

5.5.4. Materiais de vedação opacos

O projeto da casa pré fabricada deve oferecer uma variedade de materiais de vedação para paredes e coberturas de diferentes composições de materiais e propriedades térmicas, que estejam de acordo com as definições estéticas e dimensionais do projeto. Esta variedade vai possibilitar a adaptação de uma mesma casa em localidades diferentes, que tem necessidades e estratégias bioclimáticas diversas como por exemplo isolar ou não, ter maior ou menor inércia

térmica, dentre outros. Um mesmo material pode ser apropriado para determinado clima, e inapropriado para outro, por isso é preciso oferecer possibilidades para que seja possível adaptar o projeto a várias localidades. Especial atenção deve ser dada aos materiais de cobertura, pois esta área fica exposta ao sol durante todo o dia.

Para a cidade de Brasília, este trabalho mostra que os materiais mais apropriados para uso em coberturas são o CLT (*cross laminated timber*), a laje painel com isolamento em EPS. Para as paredes, os materiais com melhores resultados foram o CLT, o painel de tijolos cerâmicos, o painel Thermopore e o painel Monolite.

5.5.5 Porosidade da edificação

A direção e a velocidade dos ventos predominantes varia de acordo com o local, e as obstruções de edificações vizinhas também podem influenciar. Por isso é importante que o projeto considere a possibilidade de ventilação cruzada, e buscar propor uma diversidade de aberturas externas e mesmo internas que proporcionem este efeito. As aberturas podem ainda ser pensadas junto à modulação das fachadas da casa, de modo que a mudança de posição das janelas para promover uma maior ou menor porosidade (a depender da estratégia bioclimática do local). Para Brasília o percentual de aberturas indicado pela NBR 15220-3 é de 15% a 25% da área de piso.

5.5.6. Percentual de abertura envidraçada nas fachadas

O percentual de abertura deve ser pensado de acordo com as necessidades dos ambientes internos (aproveitamento dos visuais, integração de ambientes internos e externos, dentre outros), e levar em conta a orientação solar das fachadas através do uso de carta solar específica da latitude da cidade. A depender da orientação das aberturas envidraçadas, estas devem ser sombreadas. Para a cidade de Brasília deve-se observar principalmente as aberturas voltadas para norte e oeste, pois são os horários de maior carga térmica solar.

5.5.7. Proteção solar das aberturas envidraçadas

As proteções solares devem ser pensadas de acordo com a orientação solar de cada fachada. A necessidade de proteger ou não as aberturas deve ser identificada no contexto das estratégias bioclimáticas para cada localidade. No caso deste ser um elemento estético

importante do projeto, prever a possibilidade do uso de venezianas ou elementos que permitam o maior sombreamento possível sem prejudicar a ventilação natural.

5.5.8. Tipos de vidro

Podem ser propostos diversos tipos de vidro, com variação de propriedades, diferença de cores, ou mesmo vidros duplos. Para que isso seja possível, as esquadrias devem ser desenhadas de modo a comportar várias espessuras de vidro.

5.5.9. Sistema de aquecimento da água

O sistema de aquecimento de água deve ser especificado de modo independente do sistema de geração de energia elétrica. O ideal é que seja utilizado o aquecimento solar, por se tratar também de uso de energia renovável. Caso não seja possível pode ser utilizado também o sistema de aquecimento a gás.

5.5.10. Avaliação de conforto térmico adaptativo

Por se tratar de projetos que privilegiam o uso da ventilação natural por meio de aberturas controladas pelo usuário, a avaliação de conforto térmico adaptativo deve seguir os parâmetros da norma ASHRAE 55 – 2013. Somente será possível concluir que a casa pré fabricada em questão não necessita de condicionamento artificial caso todas as 8760 horas do ano apresentem-se dentro dos limites inferior e superior de conforto para 80% dos usuários.

5.5.11. Estimativa de consumo de energia

A estimativa de consumo de energia deve ser calculada levando em consideração o uso de equipamentos, o sistema de iluminação artificial e o sistema de condicionamento de ar.

5.5.11.1 Uso de equipamentos

O uso e a posse de equipamentos podem variar muito de acordo com o usuário. Deve-se, sempre que possível, perguntar ao usuário que equipamentos ele possui e qual seu padrão de uso. Caso não seja possível, deve-se considerar padrões de uso e determinar a potência de equipamentos eficientes, de modo que o usuário tenha acesso a estes dados e possa

compreender a base de cálculo utilizada para a determinação destes valores. É importante prever também um manual de uso aos proprietários que explique a importância de adquirir equipamentos eficientes e conscientizar quanto ao uso adequado dos equipamentos.

5.5.11.2. Sistema de iluminação artificial

O sistema de iluminação artificial deve propor uso de equipamentos e luminárias eficientes e de baixo consumo energético, sem prejudicar o conforto dos usuários. O padrão de uso pode variar muito de acordo com o usuário. Deve-se, sempre que possível, perguntar ao usuário qual seu padrão de uso. Caso não seja possível, deve-se considerar padrões de uso de modo que o usuário tenha acesso a estes dados e possa compreender a base de cálculo utilizada para a determinação destes valores. É importante prever também um manual de uso aos proprietários que explique a importância do uso adequado do sistema.

5.5.11.3. Sistema de condicionamento de ar

O cálculo de consumo energético para o ar condicionado deve ser feito de modo a suprir as horas em que os ambientes internos encontram-se fora dos limites superiores de temperatura adaptativa e inferiores aos 18oC. Deve-se especificar aparelhos de ar condicionado eficientes. Apesar do usuário poder optar por outros meios de climatização, como ventilação mecânica por exemplo, deve ser considerado o uso de ar condicionado pelo fato deste representar a pior situação do ponto de vista do consumo energético.

5.5.12. Sistema de geração de energia renovável local

O sistema de geração de energia renovável pode influenciar esteticamente no projeto da casa pré fabricada. Por isso o projeto deve prever diferentes tipos de sistema, ou no caso de oferecer apenas uma opção, deve dispor de área flexível de instalação do sistema para o caso de haver diferentes dimensionamentos do sistema de acordo com o clima. Portanto, o projeto limitará o potencial de produção de energia renovável local.

5.5.13. Análise de resultados de consumo e geração de energia elétrica

Após a avaliação de conforto térmico adaptativo, as estimativas de consumo e geração de energia devem ser sobrepostas de modo a identificar a viabilidade dos sistemas. Caso o consumo esteja maior do que a geração, deve-se alterar os parâmetros de projeto e refazer as

análises de conforto térmico. Caso a geração esteja muito superior ao consumo, pode-se optar por instalar uma quantidade menor de equipamentos no local, ou diversificar o uso propondo o uso de novas tecnologias como carros elétricos, dentre outros.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As edificações residenciais pré-fabricadas podem ser uma solução para geração distribuída e para a geração de energia renovável, contribuindo para uma matriz energética mais limpa. Para que isso seja possível, este trabalho mostra a importância da adequação do projeto ao clima local em que a casa pré fabricada se insere. Sua relação com o clima interfere diretamente nos índices de eficiência energética, e tem como consequência o impacto no consumo energético, que quanto menor for, mais facilmente pode ser suprido por fontes de geração de energias renováveis locais. Os resultados deste trabalho demonstram que as definições projetuais impactam diretamente no consumo energético da casa pré fabricada. E que o impacto se dá em sua maior parte pela energia elétrica dispensada em ajustar as condições de conforto térmico dos usuários no interior da casa. Este impacto pode ser maior ou menor, dependendo da quantidade de graus hora que os ambientes internos estão fora da zona de conforto.

A tipologia residencial pré fabricada tem a potencialidade de oferecer uma mesma solução comprovadamente eficiente para um grande número de consumidores. A produção em massa das casas as torna mais viáveis economicamente, e a popularização dos sistemas dissemina as tecnologias emergentes relacionadas à eficiência e à produção de energia. Por isso, as diretrizes de projeto propostas consideram as possibilidades oferecidas pela modulação e customização do projeto para que a casa possa, além de atender a preferências estéticas do consumidor, possa ser adaptada através de algumas modificações mínimas para atender a diretrizes de projeto bioclimático, podendo então se adaptar a diferentes climas, orientações solares, e direção dos ventos predominantes. O projeto acabará por determinar também a área disponível para instalação dos equipamentos geradores de energia elétrica fotovoltaica, definição importante e determinante quando se trata de casas ZEB.

A pré fabricação de residências unifamiliares impõe também algumas limitações. Existem limitações projetuais relacionadas às dimensões das peças, o que acaba por reduzir as diversidades de projeto. Outra limitação importante está relacionada ao cálculo do consumo energético do usuário da casa, pois a eficiência energética estará relacionada aos padrões de uso e hábitos de consumo do usuário.

Analisando os resultados de consumo de energia elétrica relacionados ao conforto térmico dos usuários para o clima de Brasília vimos que as definições de projeto tem impacto direto aos percentuais de horas de conforto nos ambientes, e conseqüentemente, impactam também no consumo energético final da casa. A combinação de materiais de parede e cobertura que se mostrou mais eficiente foi a de cobertura em placa de CLT (Cross Laminated Timber) com 200mm de espessura e paredes em Painel de Tijolos Cerâmicos de 140mm de espessura. Para esta combinação a casa apresentou um consumo anual de 7297 kWh , ou seja, 67,56 kWh/m² ao ano, e pode ser comparado a valores de consumo em casas ZEB com valores semelhantes citados na revisão de literatura. Já a combinação que se mostrou menos eficiente foi a de cobertura em Isotelha PUR de 100mm de espessura e paredes em Isofachada PUR de 100mm de espessura. Para esta combinação, a mesma casa apresentou um consumo anual de 15317,61 kWh, equivalentes a 141,83 kWh/m² ao ano, mais distante das médias de casas ZEB citadas anteriormente.

Os resultados mostram que o consumo energético chega a dobrar em um mesmo projeto apenas pela diferente especificação de material de vedação de parede e cobertura. Os resultados mostram também que os melhores valores alcançados são advindos de combinações de materiais que apresentam transmitância térmica adequada, não sendo totalmente isolantes, que é uma das principais estratégias bioclimáticas passivas para a cidade de Brasília.

É interessante perceber também nos resultados como o desconforto por frio é expressivo em muitas das combinações de materiais. Apesar de as temperaturas mais baixas ocorrerem nas madrugadas de inverno, é importante considerar o desconforto que pode ser gerado nas primeiras horas da manhã dentro dos ambientes a depender da sua orientação solar, e vedações opacas e transparentes.

Os materiais de construção industrializados disponíveis no mercado brasileiro que possibilitam a pré fabricação atualmente tem suas tecnologias importadas do exterior, como dos Estados Unidos e de países europeus. Vale ressaltar que no hemisfério norte e nas latitudes onde estes países tidos como referência na industrialização dos materiais e tecnologias da construção se localizam, a preocupação climática busca amenizar as grandes amplitudes térmicas do clima temperado ao longo do ano. Ou seja, quando faz muito frio externamente, é preciso aquecer o interior dos edifícios, e quando faz calor, é preciso resfriar. Por isso, a maior parte dos materiais importados (ou mesmo nacionais, mas com tecnologias importadas) resultam em materiais com componentes isolantes, de modo a garantir a eficiência dos sistemas artificiais de condicionamento do ar interno. No entanto, o Brasil possui extenso território, e cidades localizadas em variadas latitudes, com variados climas. E em grande parte dele o clima permite

uma grande integração entre exterior e interior, justamente por conta das condições climáticas tropicais. Muitos dos materiais pesquisados são vendidos como excelentes soluções para quem almeja a eficiência energética e a redução do consumo energético advindo da climatização artificial através do ar condicionado. Mas vimos nos resultados deste trabalho que estes materiais quando analisados do ponto de vista da ventilação natural não demonstraram desempenho favorável.

Sendo assim, outra grande limitação atual para a construção de casas pré-fabricadas diz respeito à pouca variedade de produtos industrializados no mercado que permitam abordar conceitos bioclimáticos de interação da construção com o clima em que ela se insere. Existem, no entanto, algumas opções que, a depender do clima, podem ser mais favoráveis a este tipo de solução. Para o clima da cidade de Brasília, vimos neste trabalho que se destacam os materiais de cobertura “CLT” (composto de madeira laminada), podendo ser utilizado com manta impermeabilizante reflexiva na cor branca ou com sistema laminar para telhado verde da Ecotelhado; e a Laje painel, também com impermeabilização feita com manta impermeabilizante reflexiva na cor branca. Para as paredes destacam-se os materiais painel de tijolos cerâmicos, Thermopore, Monolite e o “CLT” (composto de madeira laminada). Curiosamente dois dos materiais com melhor desempenho são compostos por elementos comumente utilizados em construções tradicionais, o tijolo cerâmico para as paredes, e a laje painel com isolamento em EPS para as coberturas.

A escolha dos materiais opacos de parede e cobertura impactam também no dimensionamento e na viabilidade do sistema de produção de energia fotovoltaica. Os resultados mostram que para 75% das combinações de materiais a quantidade de placas fotovoltaicas poderia até mesmo ser diminuída, resultando em uma maior viabilidade econômica do projeto. A energia excedente poderia ser usada também para outros fins, como carregar carros elétricos ou contribuir para o sistema de iluminação pública do condomínio. De um total de 35 combinações de materiais, temos 9 que não podem ser consideradas adequadas para alcançar resultados de consumo energético inferior ao da produção de eletricidade através dos painéis fotovoltaicos para o clima de Brasília, representando 25% das combinações de materiais opacos de parede e cobertura avaliadas neste trabalho.

Por fim, levando em consideração o clima de Brasília, os resultados deste trabalho mostram que, mesmo com o clima ameno da cidade, não foi possível proporcionar através do projeto proposto uma solução em que os ambientes internos se encontrassem totalmente dentro da zona de conforto de acordo com os parâmetros de avaliação da ASHRAE 55 – 2013. Porém, os

resultados das simulações de geração de energia são mais do que suficientes para abastecer 75% das combinações de materiais de cobertura e paredes propostos, considerando a instalação de painéis em uma área inferior à metade da área de cobertura da casa. Logo, conclui-se que é possível projetar casas pré fabricadas de balanço energético nulo para o clima de Brasília, e é possível para este clima também projetar casas pré fabricadas que produzem mais energia elétrica do que consomem.

O compromisso necessário entre a pré-fabricação e o bioclimatismo para que seja possível projetar casas pré fabricadas energeticamente eficientes encontra-se na adequada junção entre a padronização inerente aos materiais e componentes industrializados, e a particularidade necessária às adaptações de projeto para que tais construções sejam energeticamente eficientes nos diferentes climas do país. Esta junção é possível a medida que se compreendam os impactos de cada ação projetual a depender do contexto climático em que a casa se insere, e à medida que um mesmo projeto ofereça tais possibilidades de diversificação e flexibilidade para atender estratégias bioclimáticas específicas sem perder sua essência funcional, econômica e estética.

6.1 Limitações da pesquisa

Uma das limitações desta pesquisa foi a simulação energética dos modelos para a obtenção de resultados de consumo relativos à climatização dos ambientes. O software oferece sistemas complexos de condicionamento de ar em sua aba "HVAC", mas o dimensionamento e a calibragem do modelo para garantir que os resultados sejam corretos são complexos, e demandam conhecimento específico sobre o assunto. Além disso, as modelagens dos sistemas de condicionamento de ar pedem uma temperatura máxima, para que, a partir do momento que a temperatura operativa atinja este limite, seja considerado o acionamento do sistema artificial. No entanto, este estudo avaliou justamente os limites adaptativos de temperaturas máximas suportadas pelos usuários, e seria contraditório adotar uma mesma temperatura para simular o ano todo.

Outra limitação foi o acesso às informações técnicas dos materiais utilizados nas simulações, principalmente no que diz respeito às propriedades térmicas. Muitos dos fabricantes não possuíam catálogos técnicos oficiais, e outros trazem em seus catálogos informações incompletas, ou apenas a menção de que o desempenho térmico do material foi aprovado pela NBR 15575 – 2013, mas sem mencionar para que localidade por exemplo.

6.2 Recomendações para trabalhos futuros

Este estudo pode ser desenvolvido em diversas frentes em futuras pesquisas.

Uma possibilidade é utilizar os materiais mais apropriados encontrados neste trabalho e aplicar a metodologia utilizada variando outros fatores de projeto, como a porosidade da casa; os percentuais de aberturas envidraçadas e tipos de vidro; as proteções solares; a orientação solar; enfim, verificar o impacto de cada alteração de projeto na análise conforto térmico para edificações ventiladas naturalmente.

Outra possibilidade de desenvolvimento do tema é de avaliar a melhora do conforto térmico partindo de soluções mais simples, como aumentando a velocidade do ar por ventilação mecânica, ou introduzindo outros tipos de sistemas de condicionamento de ar menos impactantes que o ar condicionado. Isto permitiria verificar de forma mais gradual o aumento no consumo de energia através de soluções mais simples, e muitas vezes menos caras.

O estudo pode ainda ser realizado para diferentes cidades do país, uma vez que uma mesma casa pré-fabricada pode ser construída em localidades diversas, e apontar quais as combinações de materiais seriam mais adequadas para o clima de cada cidade. Assim seria possível disseminar a nível nacional um mesmo projeto que, através da alteração de materiais de acordo com cada zona bioclimática, teriam o desempenho térmico garantido.

Pode-se também realizar um levantamento de custos de investimento e de custos ambientais e ciclo de vida dos diferentes materiais. Uma análise mais aprofundada levando em conta a viabilidade econômica e o custo ambiental poderia resultar em um cálculo de payback em que se verificaria se a solução proposta é viável.

O presente estudo poderia ser verificado e calibrado através da construção de um protótipo, em que seriam feitas medições e comparações aos resultados das simulações.

Por fim, pode ser realizado um estudo no âmbito do planejamento urbano, em que se proponha que o excedente de energia elétrica gerado por áreas residenciais possam suprir a necessidade de áreas comerciais ou industriais, por exemplo.

7. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575**: Desempenho de Edificações Habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.

ALVIM, L. G. **Avaliação do desempenho e do conforto térmico de uma edificação ventilada naturalmente seguindo as normas brasileiras de desempenho térmico e a ASHRAE 55**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

AMORIM, C.N.D. **Illuminazione Naturale, Comfort Visivo ed Efficienza Energetica in Edifici Commerciali: Proposte Progettuali e Tecnologiche in contesto di clima Tropicale**. Tese de Doutorado. Università degli Studi di Roma "La Sapienza". Dezembro 2000.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482 de 17 de Abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 19 set 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>> Acesso em 06/08/2016.

_____. **Resolução Normativa nº 687 de 24 de Novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos procedimentos de distribuição – PRODIST. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>> Acesso em 06/08/2016.

Archi +. Disponível em: < <http://www.dezeen.com/2015/02/22/prefabricated-house-melbourne-city-square-archiblox-carbon-positive-house/>>. Acesso em 03 de março de 2015.

ASHRAE. **ASHRAE - 55 2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2013.

AUSTRALIAN GOVERNMENT. **Your Home: Australia's guide to environmentally sustainable homes**. Disponível em: <http://www.yourhome.gov.au/> Acesso em 10 de Maio de 2016.

AYMONINO, Carlo. **La vivanda racional**. São Paulo: Gustavo Gili, 1973

BERGDOLL, Barry e CHRISTENSEN, Peter. **Home Delivery: Fabricating the Modern Dwelling, Parte 1**. Nova Iorque, MoMa 2008.

BERNASCONI, José Roberto. **Infraestrutura de grandes conjuntos habitacionais**. Revista Techné, ed.130, p. 48-50, jan. 2008.

BRASIL. **Instrução Normativa MPOG/SLTI nº 2**. Dispõe sobre regras para a aquisição ou locação de máquinas e aparelhos consumidores de energia pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, e uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nos projetos e respectivas edificações públicas federais novas ou que recebam retrofit. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 4 jun. 2014.

_____. Portaria n. 18, 16 de janeiro de 2012. **Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Ministério do Desenvolvimento, I.E.C.E.I.N.D.M., Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO. Rio de Janeiro, 2012.

Blu Homes. Disponível em: < <https://www.bluhomes.com> >. Acesso em Acesso em 13 de abril de 2015.

Catálogos da Sears. Disponível em: <http://www.searsarchives.com/homes/1915-1920.htm>. Acesso em 7 de maio de 2015.

CEB – Companhia Energética de Brasília. **Dados primários fornecidos para fins acadêmicos**. Brasília, fevereiro de 2016.

CHIN, Andrea. Design boom, 3 de julho de 2013. Disponível em: <http://www.designboom.com/architecture/philippe-starck-with-riko-p-a-t-h-pre-fab-homes/>. Acessado em 16 de maio de 2016.

CLARKE, J. A. **Energy Simulation in Building Design**. 2nd Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. ix-x ISBN 978-0-7506-5082-3. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750650823500000> Acesso em 23 de Maio de 2017.

Climatempo, 2017. Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/climatologia/61/brasil-df>>

CODEPLAN – Companhia de desenvolvimento do planalto central. **Atlas do Distrito Federal**. GDF, Brasília, 1984.

COMISAO LUIS CRULS. **Sesquicentenário do nascimento de Luis Cruls – 1848-1998**. Governo do Distrito Federal, 1998.

Connect:Homes. Disponível em: <http://connect-homes.com/> Acessado em 13 de Maio de 2016.

Crosslam. Disponível em: <http://www.crosslam.com.br/home/?q=downloads>. Acesso em 20 de dezembro de 2016.

DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. S. Thermal Comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, v. 34, n. 6, p. 549-561, 2002.

DE VECCHI, R. et al. ASHRAE 55 **Adaptative model application in hot and humid climates: the Brazilian case**. *Architectural Science Review*, v.58, n.1, p. 93-101, 2014.

DIDONÉ E. L. et al. **Estratégias para edifícios de escritórios de energia zero no Brasil com ênfase em BIPV**. In: Associação Nacional de Tecnologia do ambiente construído. Porto Alegre, jul/set 2014. p. 27-42.

DOE. Building Energy Software Tools Directory. UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/ Acesso em: 20 de Maio de 2016.

DOMINGOS, Lucas; KALZ, Dorren; DINKEL, Arnulf; LOMARDO, Louise; SILVA, Vanessa. **Definição de uma classificação climática para o estudo de edificações com balanço anual zero de energia no Brasil**. XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente construído, p.213-222, novembro de 2014, Maceió.

Dry wall. Disponível em: http://rocherdrywall.com.br/old/steel_frame.php . Acesso em 10 de janeiro de 2016.

Ecotelhado. Disponível em: <https://ecotelhado.com/portfolio/ecotelhado-telhado-verde/sistema-laminar-medio/> . Acesso em 12 de janeiro de 2016.

ELEB-VIDAL, Monique; CHATELÉT, Anne Marie; MANDOUL, Thierry. **La flexibilidade como dispositivo. Flexibility as a device**. In: Quaderns. Barcelona, n. 202, 1994.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Avaliação da Eficiência energética para os próximos 10 anos (2012-2021)**. Rio de Janeiro, 2012.

_____ . **Demanda de energia 2050**. Rio de Janeiro, 2014.

EVANS, Robin. **The projective cast: architecture and its three geometries**. United States of America: Cambridge, Massachussets, 2000.

FERREIRA, C. P. **Alguns Dados sobre o clima para edificação em Brasília**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, 1965.

Fluxovento. Software gratuito desenvolvido por Carlos Vitor de Alencar Carvalho e Luiz Fernando Martha. Disponível para download em: http://www.ecivilnet.com/software/fluxovento_analise_ventilacao.htm

FRANCO, José Tomaz. **A Casa Desmontável 8x8 de Jean Prouvé poderá ser visitada pela primeira vez na Galerie Patrick Seguin**. Disponível em: <<http://www.archdaily.com.br/br/01-169601/a-casa-desmontavel-8x8-de-jean-prouve-podera-ser-visitada-pela-primeira-vez-na-galerie-patrick-seguin>> Acesso em 20 de junho de 2015.

FURUTO, Alison. **Connect:Homes Offers Affordable, Modern, Sustainable Homes**. Arch Daily, 30 de Maio de 2012. Disponível em: <http://www.archdaily.com/238195/connecthomes-offers-affordable-modern-sustainable-homes/> Acessado em 12 de maio de 2016.

GIEDION, Siegfried. **Espaço, tempo e arquitetura: o desenvolvimento de uma nova tradição**. São Paulo: Martins Fontes, 2004.

GIVONI, B. **Comfort, climate analysis and building design guidelines**. Energy and Buildings, v.18, n.1, p. 11-23, 1992.

GOULART, S.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados Climáticos Para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras**. PW ed., São Paulo, dez. 1997.

GROPIUS, Walter. **Bauhaus: novarquitectura**. Tradução J. Guinsburg e Ingrid Dormien. 5. ed. São Paulo: Perspectiva, 1997.

HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Oxon: Spon Press, 2011.

Ideablox. Disponível em: <http://www.ideabox.us> Acessado em 14 de Maio de 2016.

IEA. **Solution sets and net zero energy buildings: a review of 30 net zebs case studies worldwide**. Excerpt from: IEA Task 40 / Annex 52 towards net zero energy solar buildings. Paris, France: International Energy Agency, 2014.

IMPERIALE, Alicia. **An American Wartime Dream: The Packaged House System Of Konrad Wachsmann And Walter Gropius**. Temple University, 2012.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas 1961-1990**. Brasília, DF, 1992.

_____. Arquivos climáticos 2016. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016> Acessado em 20 de janeiro de 2017.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Edificações residenciais etiquetadas**. Disponível em: < <http://www.pbeedifica.com.br/edificacoes-etiquetadas/residencial> > Acesso em 8 de agosto de 2016.

Isoeste. Catálogo Técnico Comercial 2016.

KNAPP, Chris. **Por que é hora de abandonar a pré-fabricação? (Why It's Time to Give Up on Prefab)** 27 Dez 2013. ArchDaily Brasil. (Trad. Julia, Maria) Acessado 26 Mai 2015. <<http://www.archdaily.com.br/163194/por-que-e-hora-de-abandonar-a-pre-fabricacao>>

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. Rio de Janeiro, Eletrobras/PROCEL, 2014.

LAMBERTS, R.; CÂNDIDO, C; DE DEAR, R.; VECCHI, R. **Towards a brazilian standard on thermal comfort**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC, 2013.

LE CORBUSIER. **Por uma arquitetura**. 5. ed. São Paulo: Perspectiva, 1994.

MACIEL, A. A. **Projeto Bioclimático em Brasília: Estudo de caso em edifício de escritórios**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MADER, Helena. **Expansão Luxuosa ao sul do Distrito Federal**. 22 Ago 2010. Correio Braziliense. Acessado 26 Ago 2016. Disponível em: <http://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/cidades/2010/08/22/interna_cidadesdf,209118/expansao-luxuosa-ao-sul-do-distrito-federal.shtml>

MARTINS, José Carlos (org.) **Desempenho de edificações habitacionais – Guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013**. Brasília: Câmara Brasileira da Indústria da Construção – CBIC, 2013.

Mima House. Disponível em <<http://www.mimahousing.com>>. Acesso em 13 de abril de 2015.

Monolite. Disponível em: <<http://www.monolite.com.br/home>>. Acesso em 25 de janeiro de 2017.

MUMFORD, Lewis. **A cidade na história: suas origens, transformações e perspectiva**. São Paulo, Martins Fontes, 2008. 742 p. ilus.

OLESEN, B. W. The philosophy behind EN15251: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings. *Energy and Buildings*, v. 39, n. 7, p. 740-749, 2007.

Packaged House System, 1942-1952. Harvard Art Museums/Busch-Reisinger Museum, Gift of Ise Gropius. Disponível em: <http://www.harvardartmuseums.org/art/51954>. Acesso em 22 de junho de 2015.

Painel de tijolos cerâmicos. Disponível em: < <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/191/artigo286987-1.aspx> > . Acesso em 18 de janeiro de 2016.

PEREIRA, E.B, MARTINS, F.R., ABREU, S.L., e RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006.

PETERS, Nils. **Jean Prouvé – A dinâmica da criação**. Colônia: Taschen 2007.

Prefatto. Disponível em: <http://www.prefatto.com.br/pre_lajes_painel.php>

Projeteee 2017. Disponível em: <<http://150.162.76.139/graficos/>>

PVSYST. v. Software for the Study and Simulation of Photovoltaic Systems. 2016

Residencial Alphaville. Disponível em: <<http://www.alphaville.com.br/empreendimento/subprodbrasil>>

Residencial Damha. Disponível em: <<http://www.damha.com.br/empreendimentos/damha-ii-brasil>>

ROMERO, M. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. São Paulo, ProEditores, 2000.

ROMERO, M. A. e REIS, L. B. **Eficiência Energética Em Edifícios**. São Paulo, 2012.

RORIZ, M; GHISI, E; LAMBERTS, R. Uma proposta de norma técnica brasileira sobre desempenho térmico de habitações populares. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5., 1999. Fortaleza. Anais. Fortaleza: ANTAC, 1999, Artigo n. 288.

RORIZ, M. Uma proposta de revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Carlos, 2012.

ROWE, Peter G. **Modernity and housing**. Cambridge: MIT Press, 1995.

SALEIRO FILHO, Mário de Oliveira. **A gênese da flexibilidade espacial**. In: Cadernos do PROARQ. Rio de Janeiro, n. 13, 2009.

Sol Ar. Disponível em: < <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/software/analysis-sol-ar> >
Acesso em 13 de dezembro de 2016.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. Análise do método de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15575. Encontro nacional de conforto no Ambiente Construído, Brasília, 2013.

SORGATO, M. J. **A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

FERREIRA, C. P. **Alguns Dados sobre o clima para edificação em Brasília**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, 1965.

SEDHAB – Secretaria de Estado de Habitação, Regularização e Desenvolvimento Urbano do Distrito Federal. **Diretrizes Urbanísticas Região Sul/Sudeste**. Dezembro de 2013. Disponível em:
<http://www.sedhab.df.gov.br/pdfs/atualizacao_diretrizes_2014/DIUR_07_2013_regiao_sul_sudeste_df_140.pdf>

SMITHSON, Alison; SMITHSON, Peter. **Cambiando el arte de habitar**. Barcelona: Gustavo Gili, 2001 (1994).

Starck with riko. Disponível em: <<http://www.starckwithriko.com/>>. Acesso em 17 de maio de 2016.

TAHAN, L; LANNES, P. **Patrimônio em Jogo**. 24 de Novembro de 2013. Disponível em: <<http://jornalgalodebriga.blogspot.com.br/2013/11/patrimonio-em-jogo.html>> Acesso em 20 de outubro de 2015.

Thermopore. Disponível em: <<http://www.ecopore.com.br/aplicacoes/painel-de-concreto-celular/>>. Acesso em 25 de janeiro de 2017.

TORCELLINI, P. et al. **Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition**. California: ACEEE Summer Study, 2006.

TRIGO, C. C. **Pré-fabricados em argamassa armada: material, técnica e desenho de componentes desenvolvidos por Lelé**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

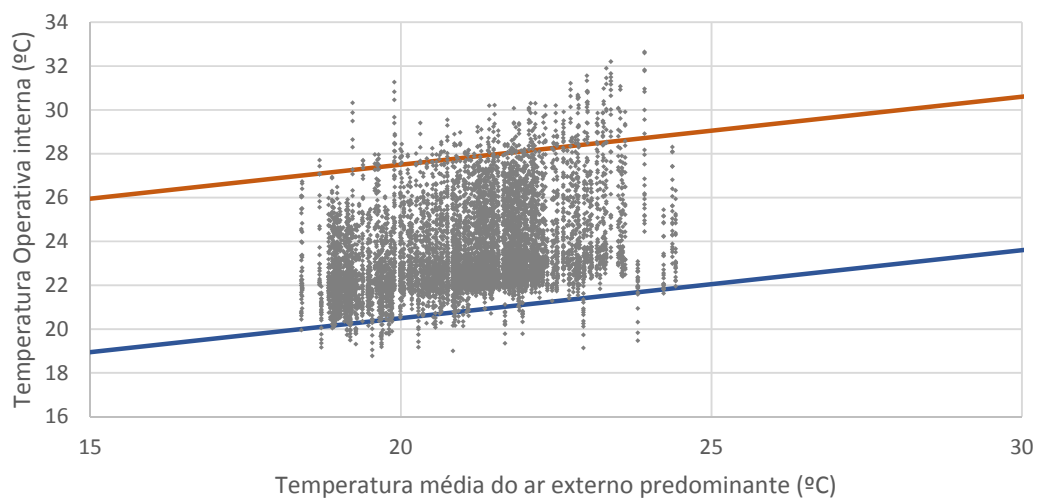
VASCONCELOS, A. C. **O concreto no Brasil: pré-fabricação**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 2002.

VOSS, K. and MUSALL, E. **Net Zero Energy Buildings: International projects of carbon neutrality in buildings**. Ed. Green Books. Munique, 2013.

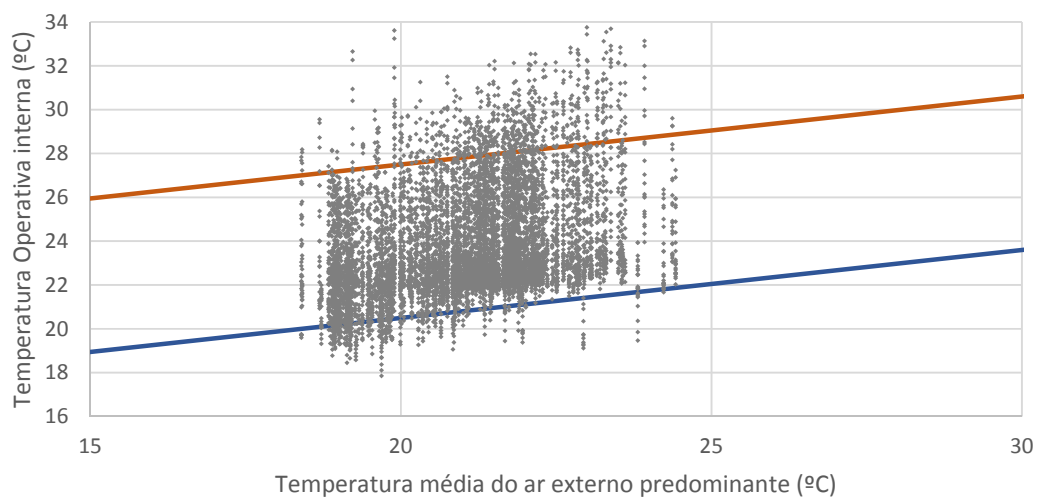
WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Building Simulation Calibration Using Sensitivity Analysis. BUILDING SIMULATION. Montreal: IBPSA: p. 1221-1228, 2005.

APÊNDICE I – Resultados das horas de conforto por ambiente

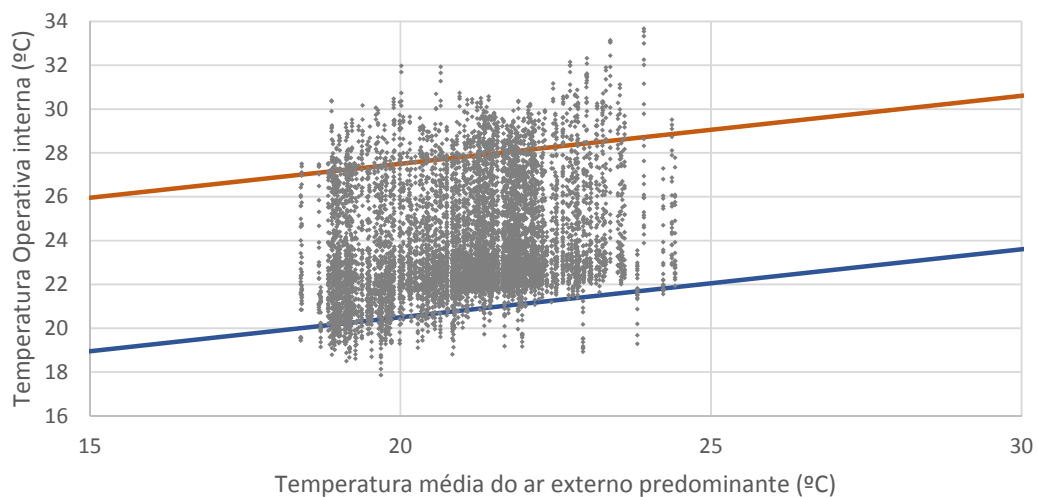
Quarto 1 - parede Isofachada LDR / cobertura CLT+teto verde



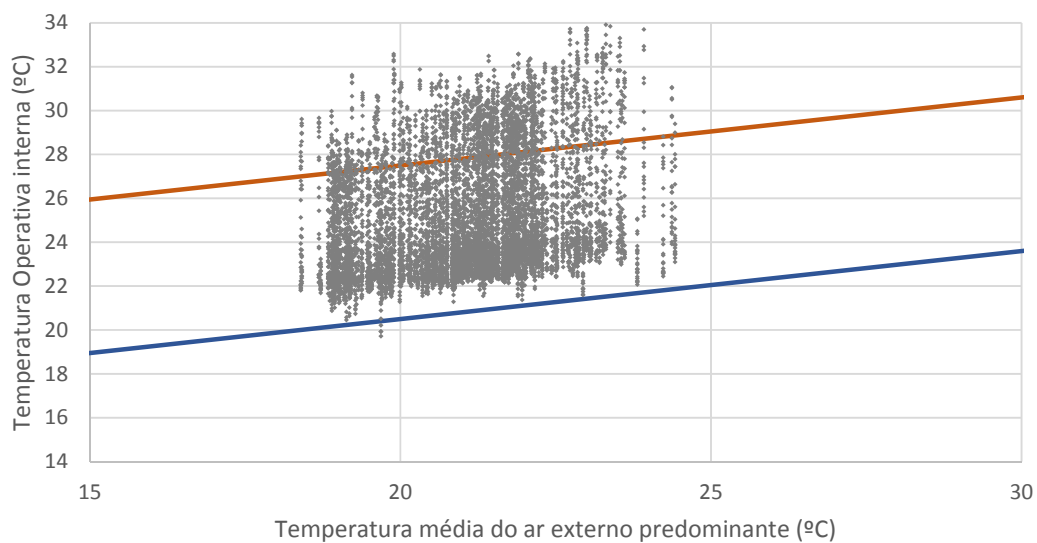
Quarto 2 - parede Isofachada LDR / cobertura CLT+teto verde



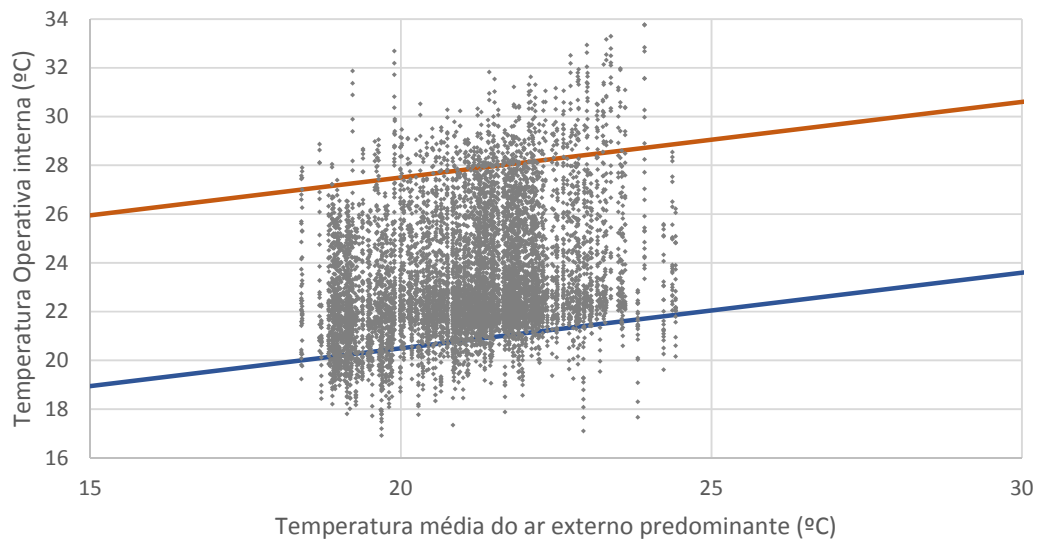
Quarto 3 - parede Isofachada LDR / cobertura CLT+teto verde



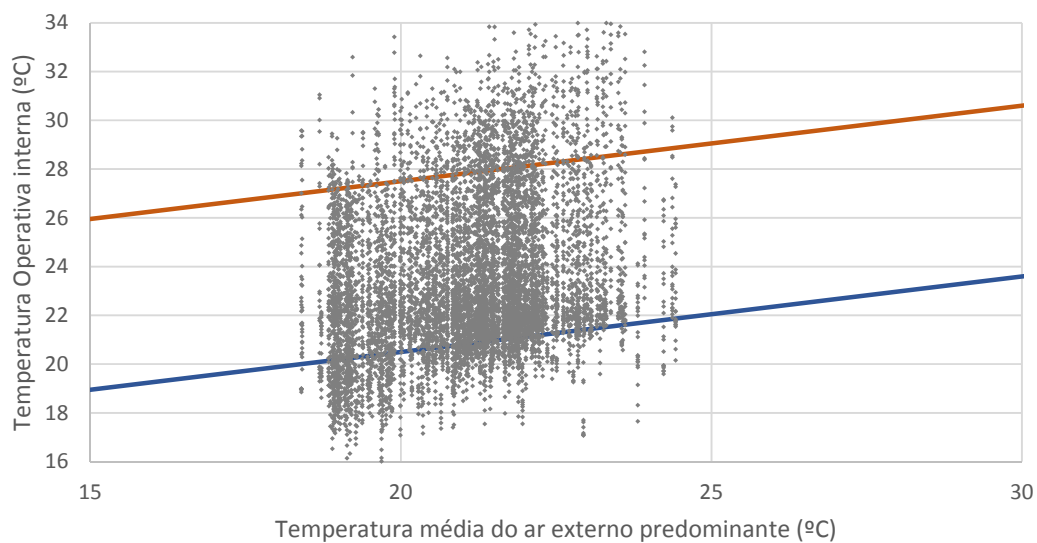
Sala - parede Isofachada LDR / cobertura CLT+teto verde



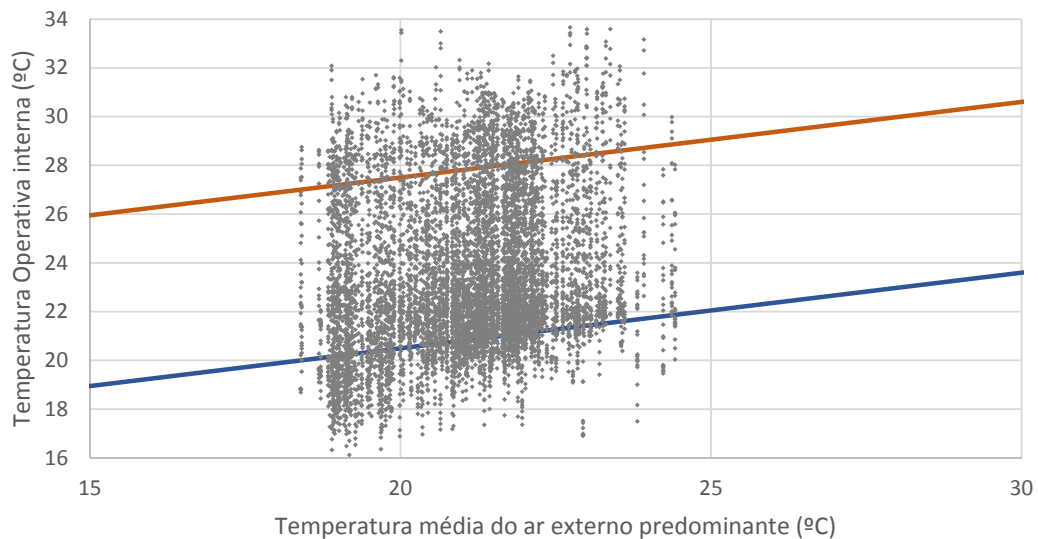
Quarto 1 - parede Isotelha LDR / cobertura Isotelha EPS



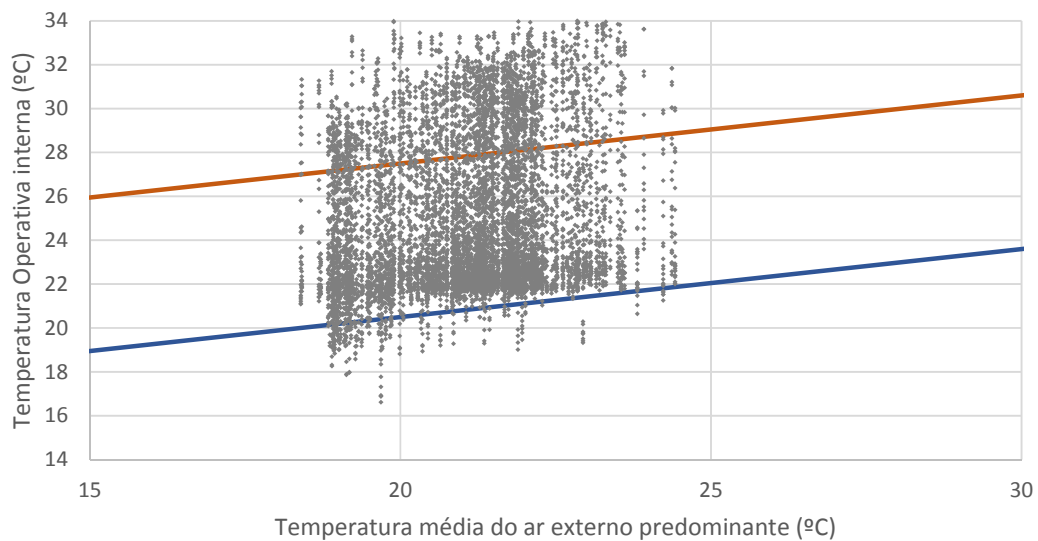
Quarto 2 - parede Isotelha LDR / cobertura Isotelha EPS



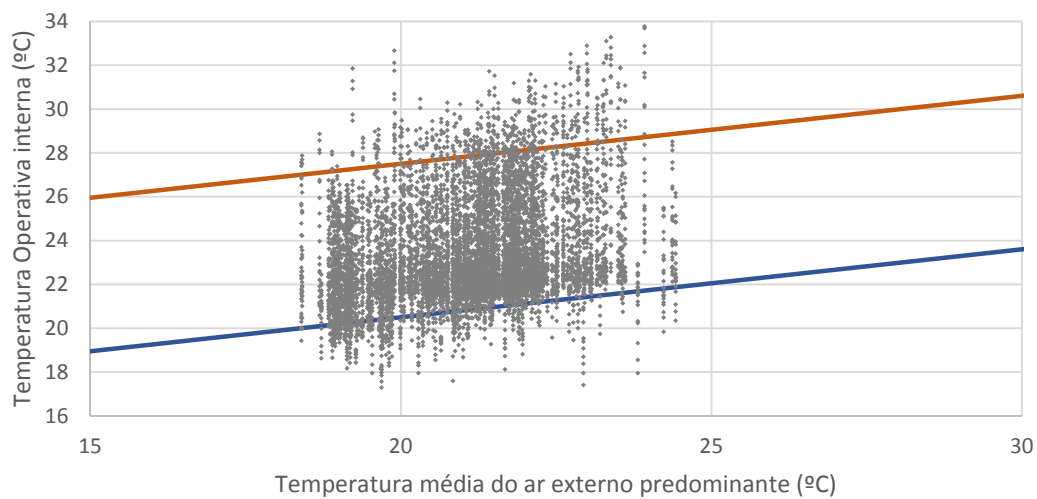
Quarto 3 - parede Isotelha LDR / cobertura Isotelha EPS



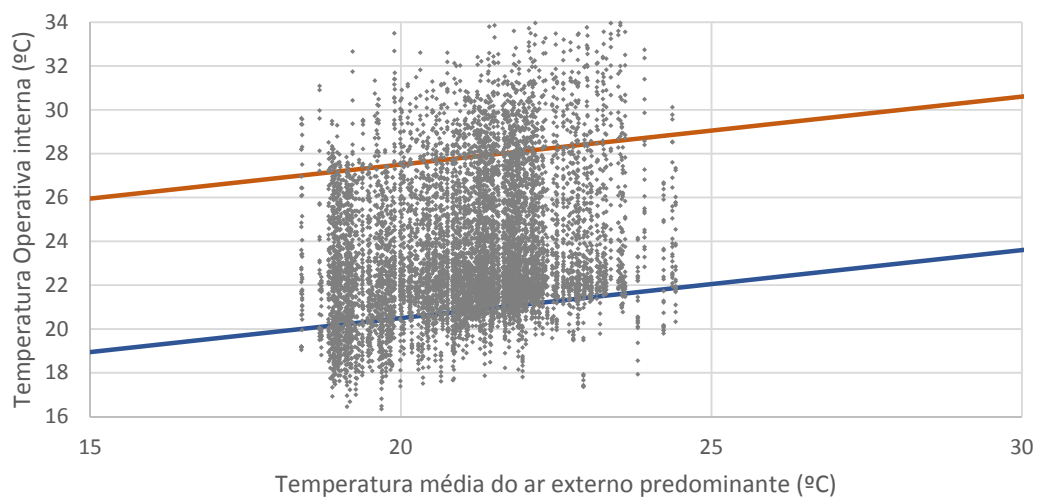
Sala - parede Isotelha LDR / cobertura Isotelha EPS



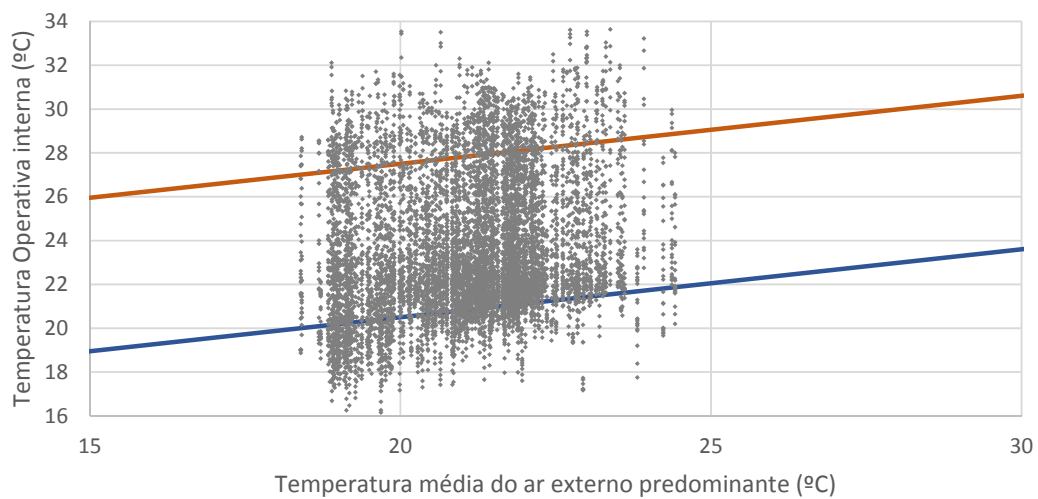
Quarto 1 - parede Isofachada LDR / cobertura Isotelha
PUR



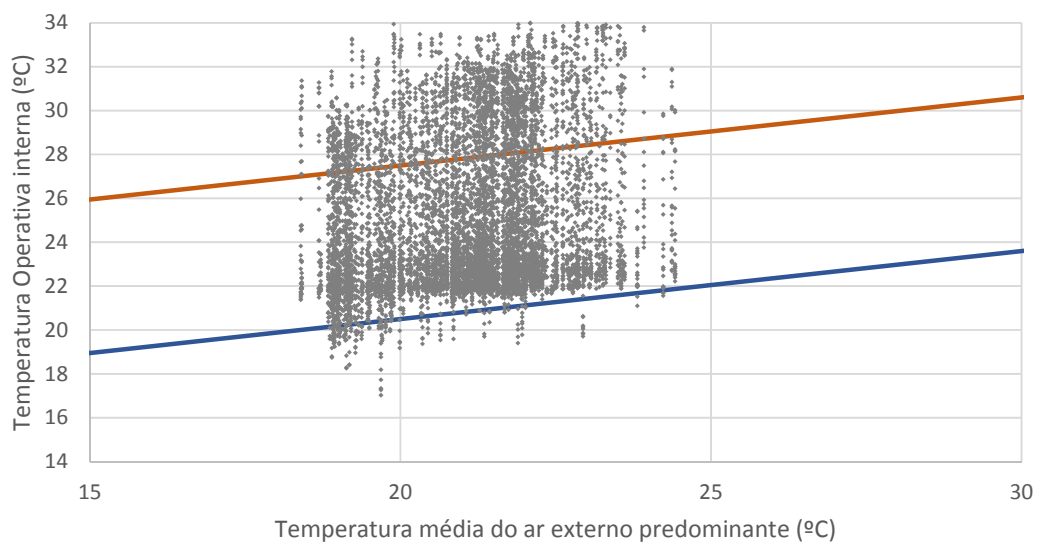
Quarto 2 - parede Isofachada LDR / cobertura Isotelha
PUR



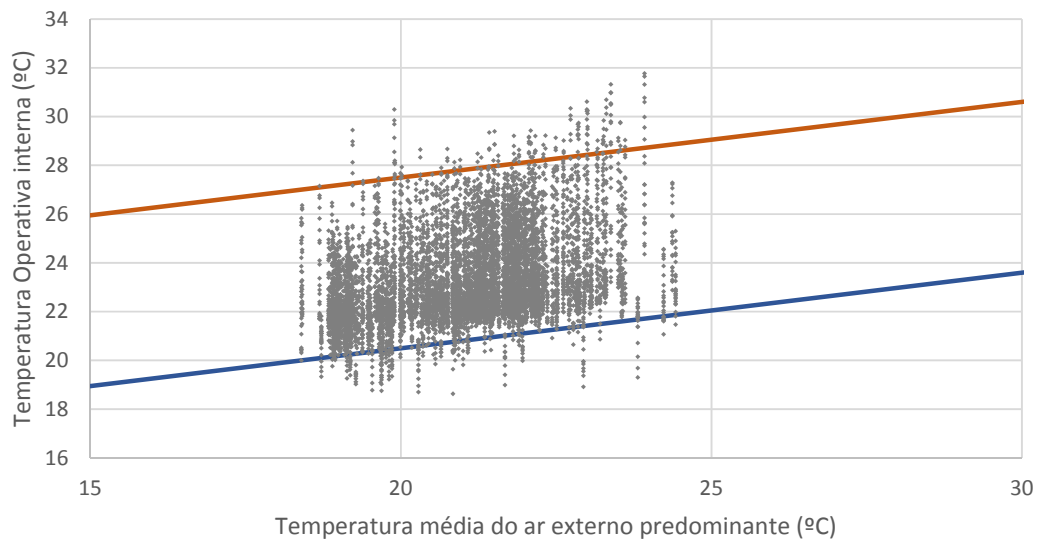
Quarto 3 - parede Isofachada LDR / cobertura Isotelha PUR



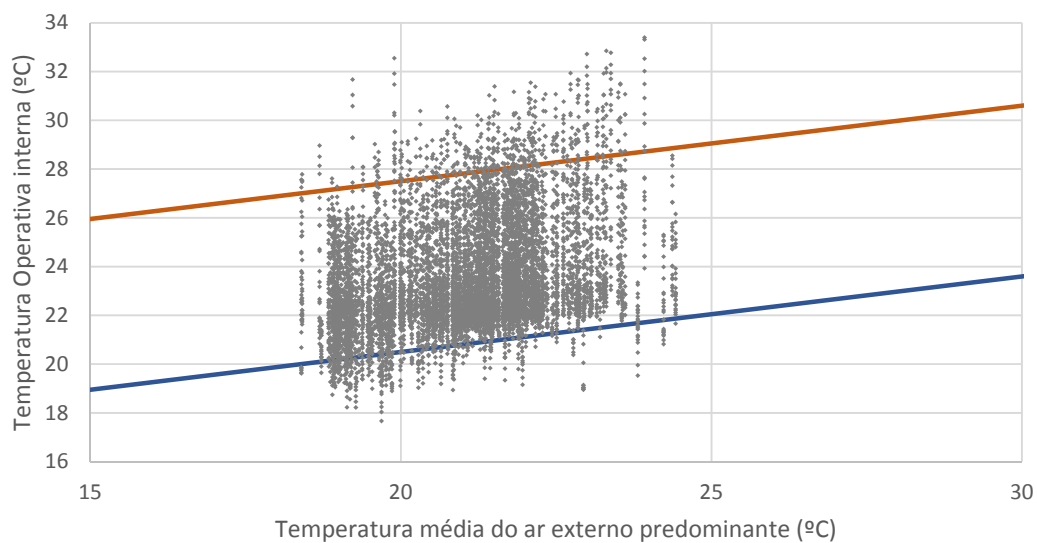
Sala - parede Isofachada LDR / cobertura Isotelha PUR

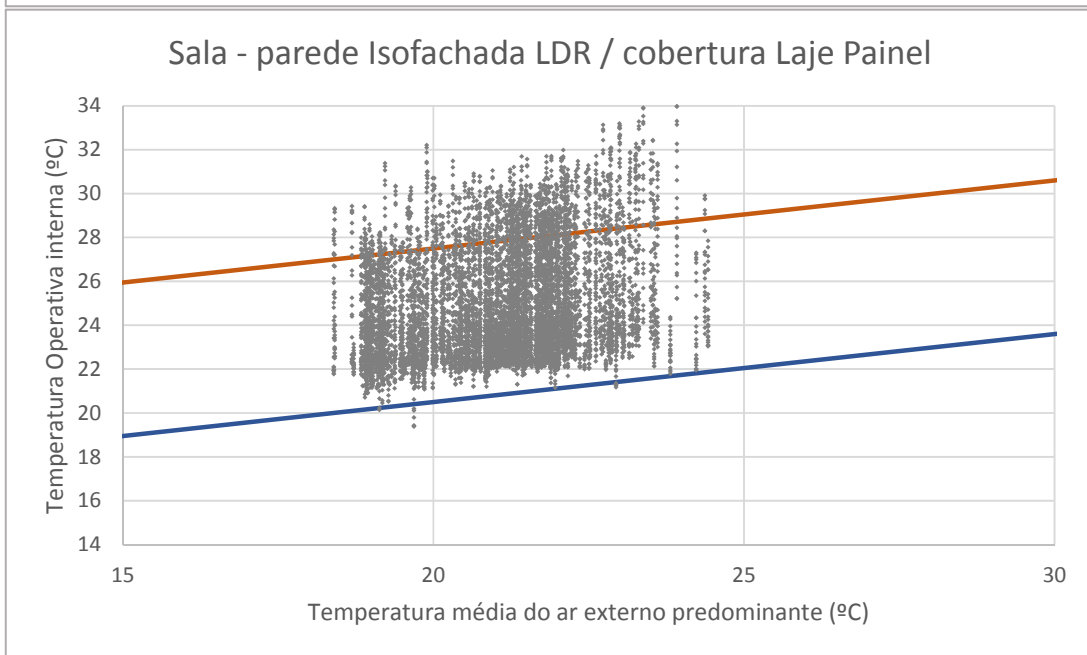
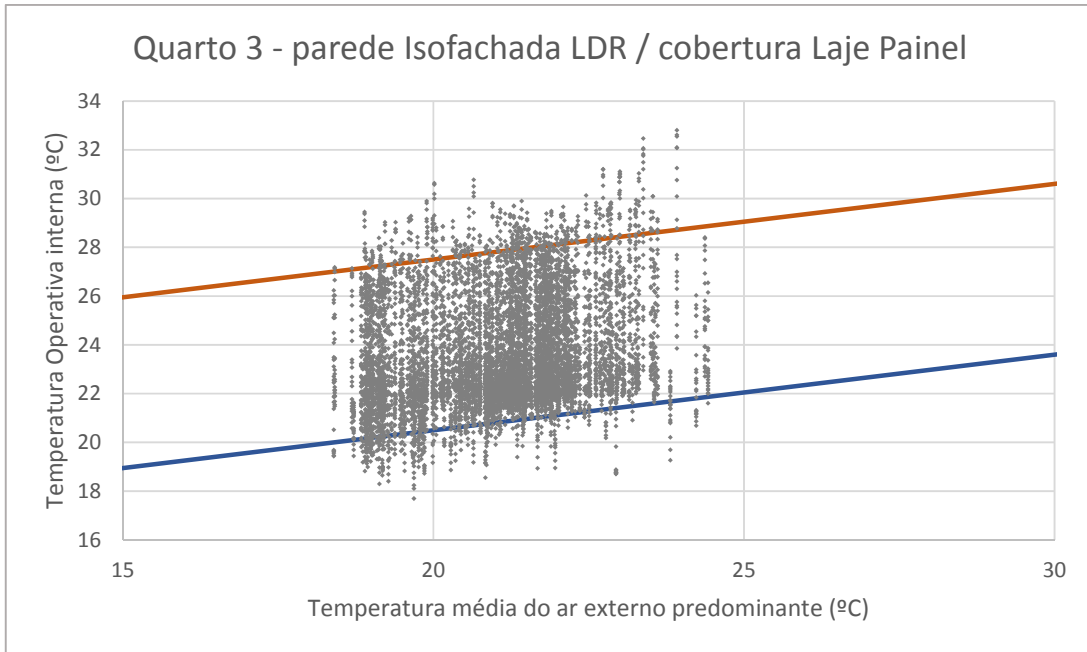


Quarto 1 - parede Isofachada LDR / cobertura Laje Painel

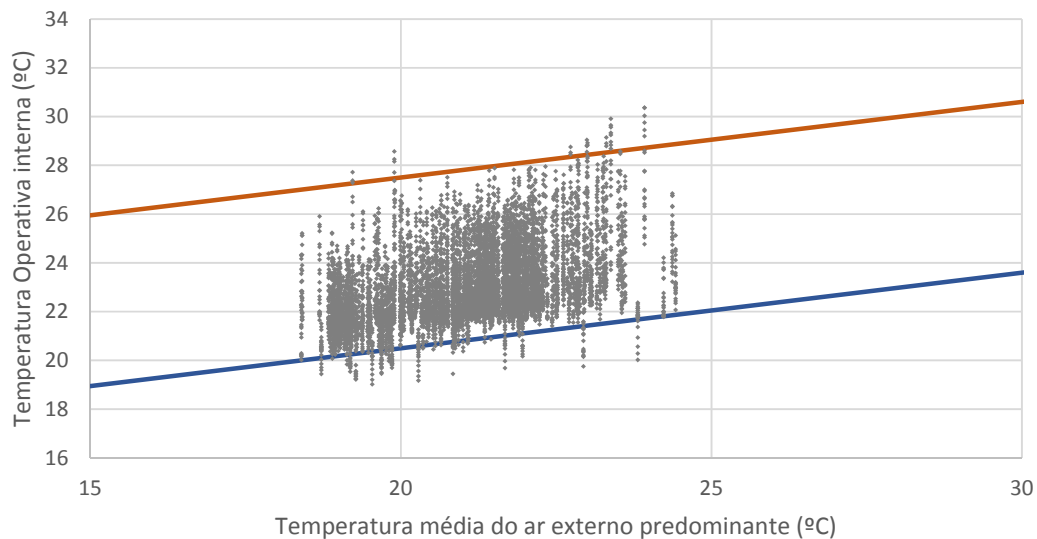


Quarto 2 - parede Isofachada LDR / cobertura Laje Painel

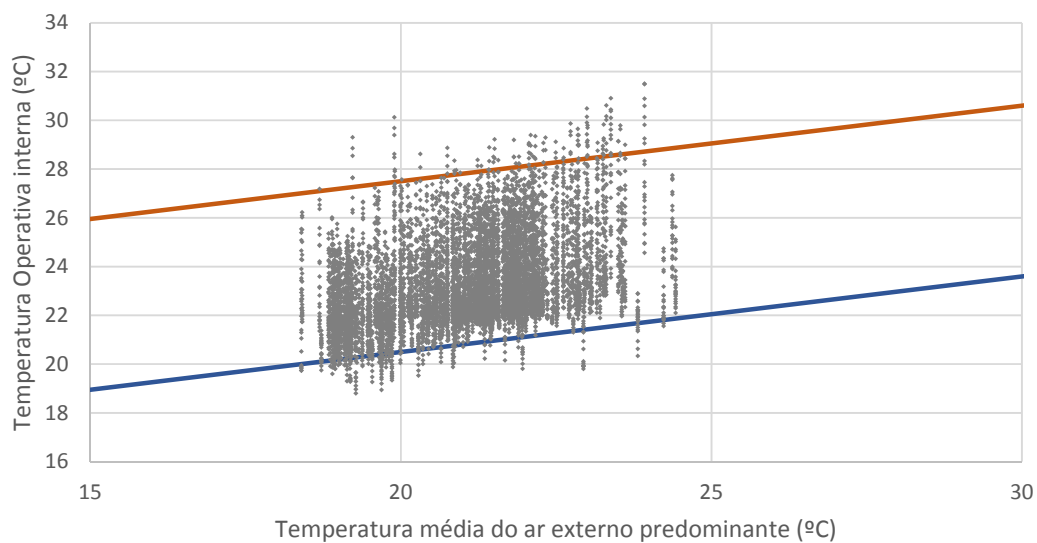




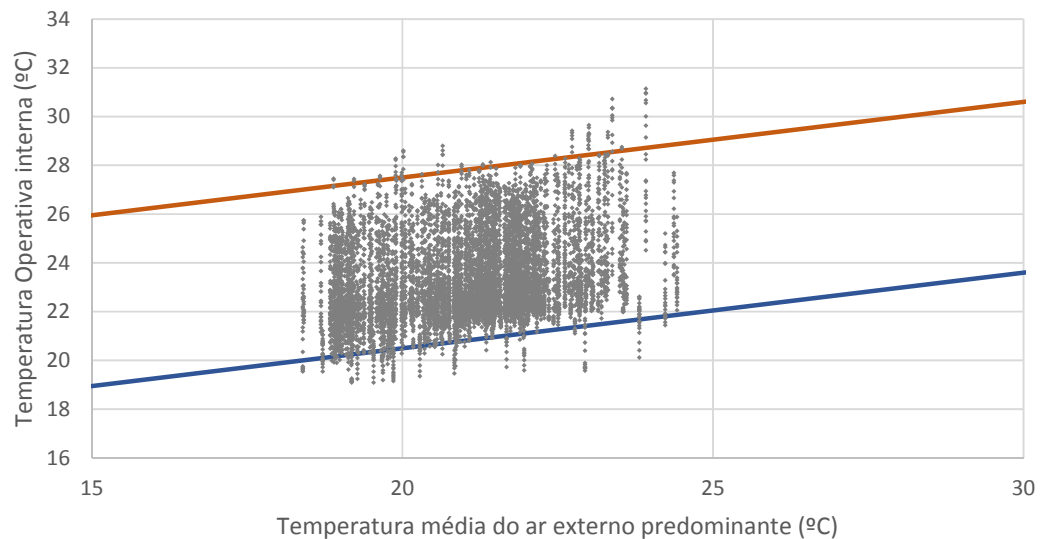
Quarto 1 - parede Monolite / cobertura CLT+manta



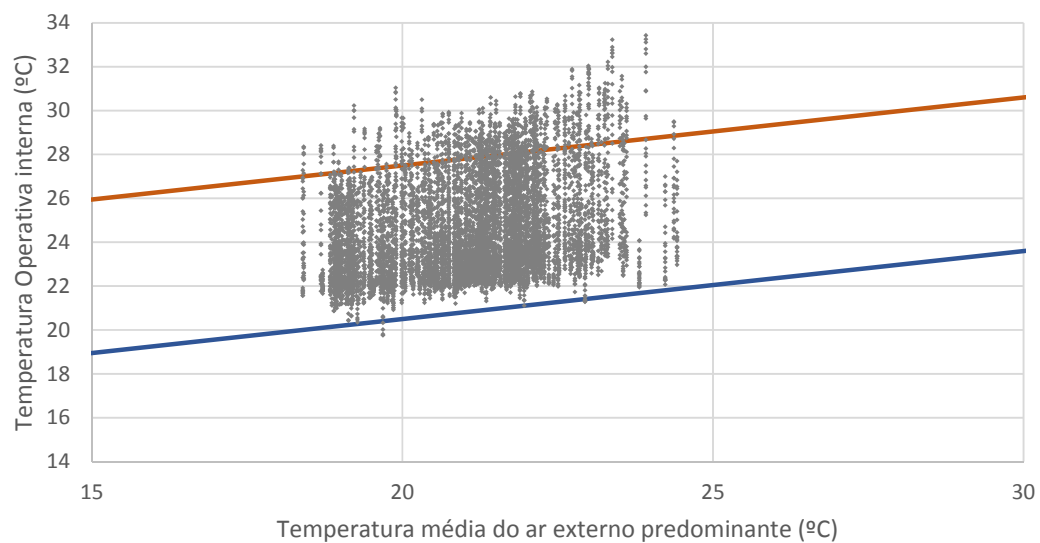
Quarto 2 - parede Monolite / cobertura CLT+manta



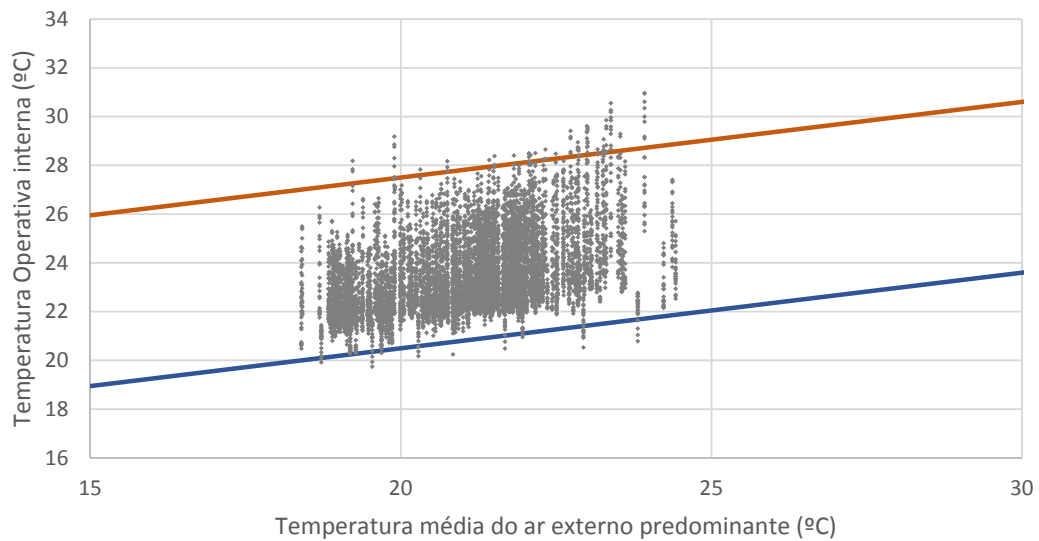
Quarto 3 - parede Monolite / cobertura CLT+manta



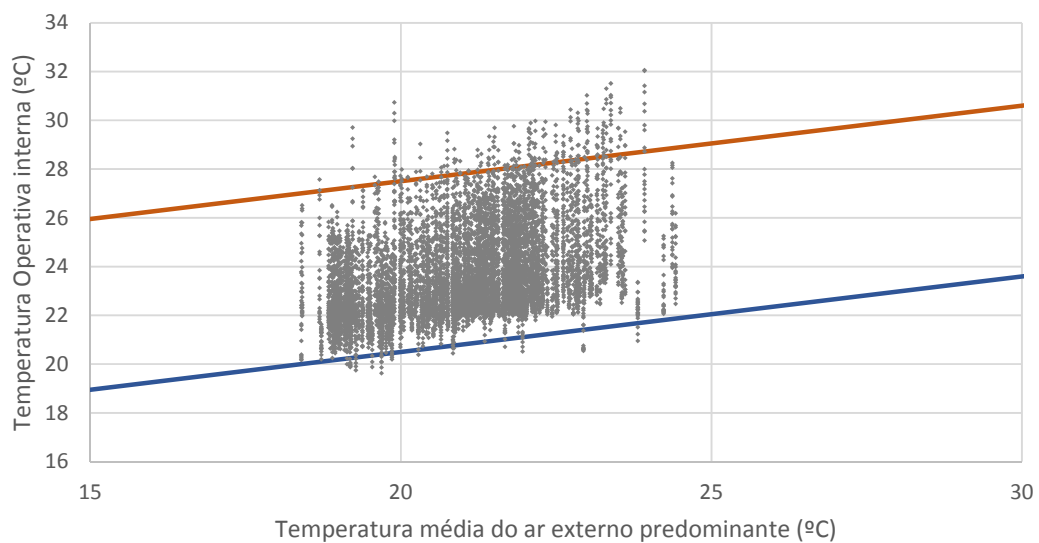
Sala - parede Monolite / cobertura CLT+manta

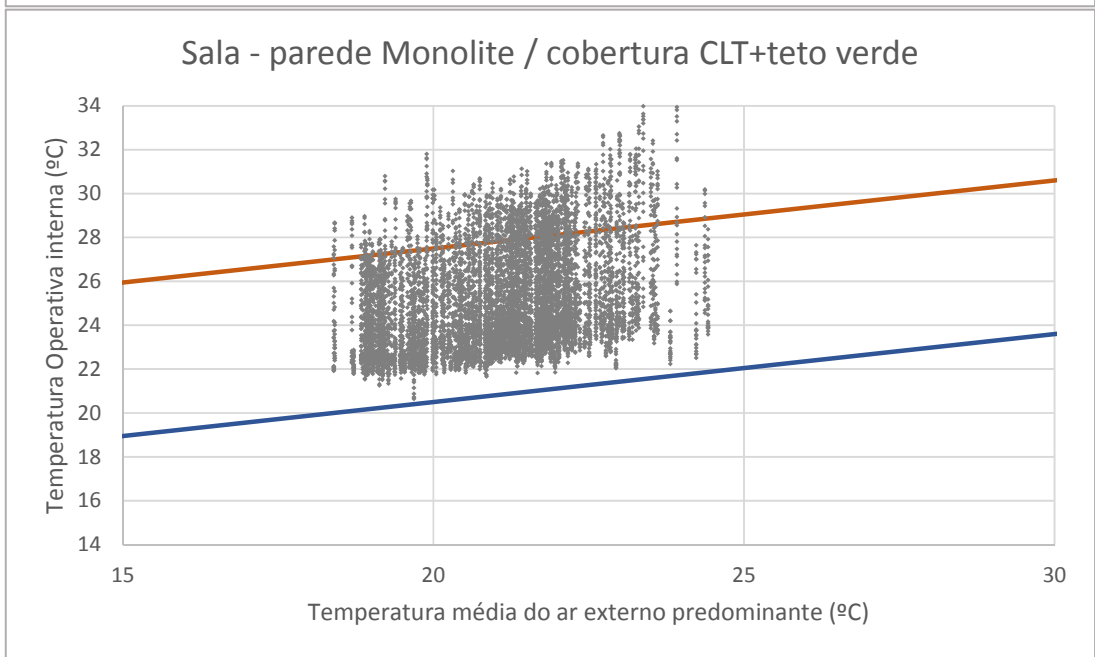
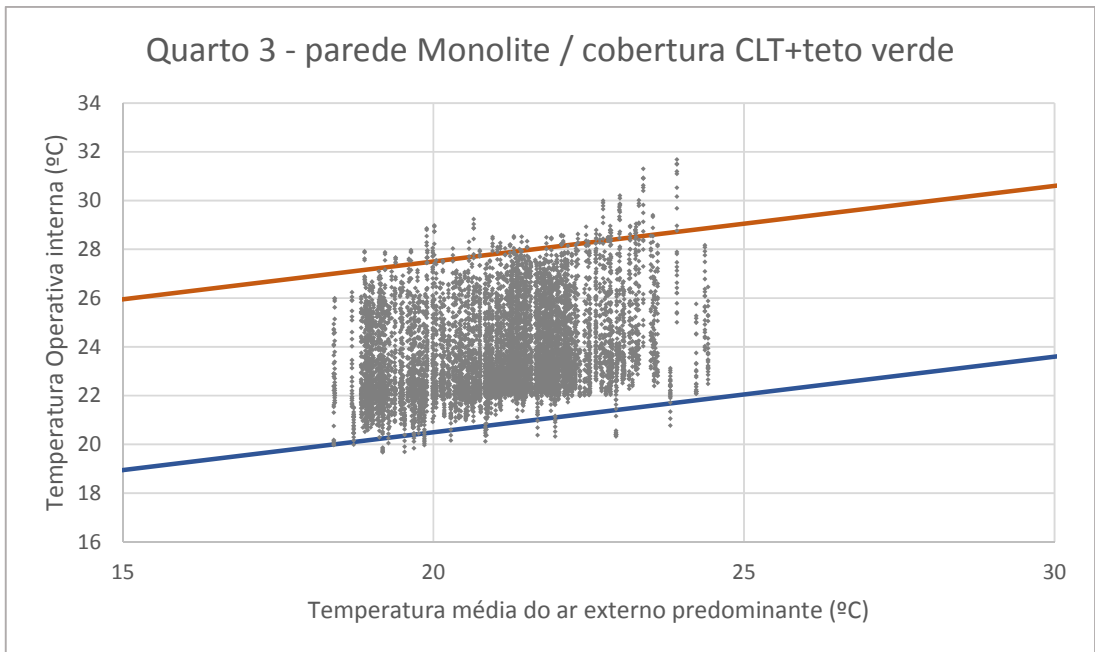


Quarto 1 - parede Monolite / cobertura CLT+teto verde

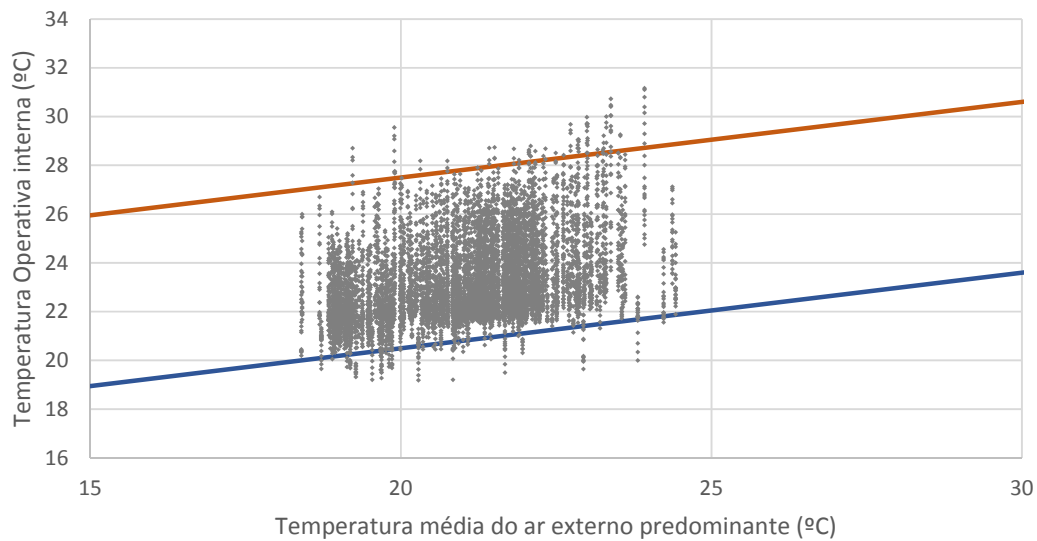


Quarto 2 - parede Monolite / cobertura CLT+teto verde

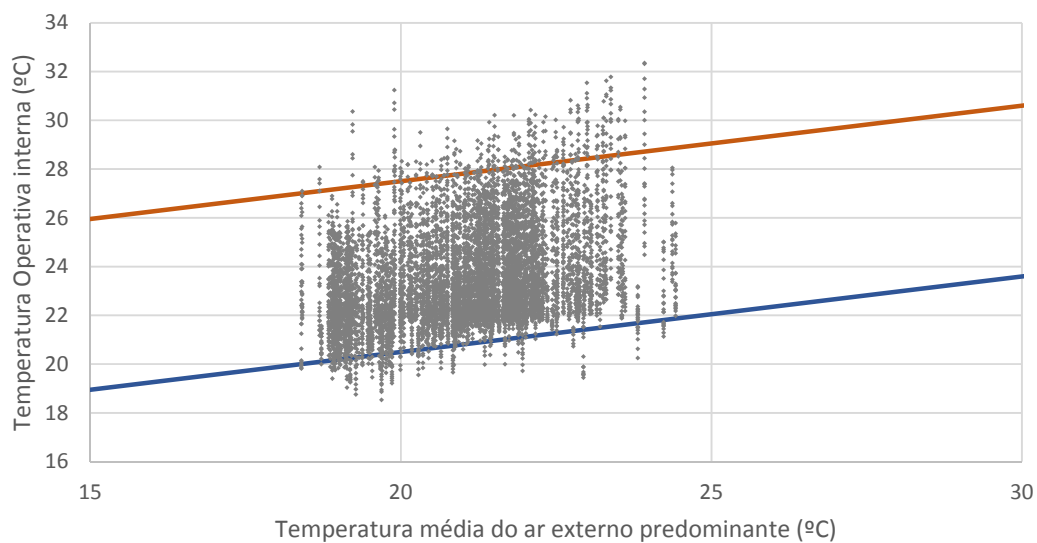




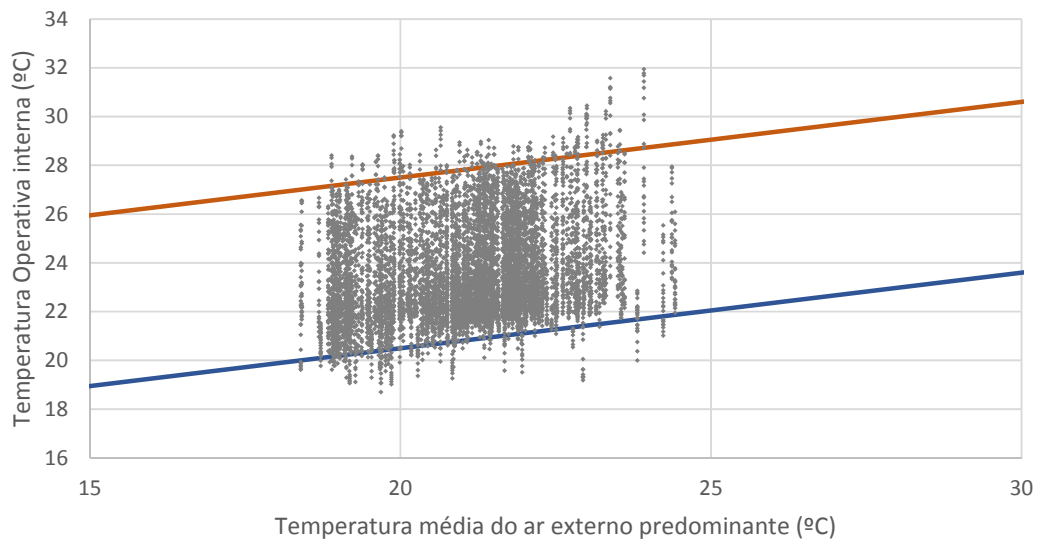
Quarto 1 - parede Monolite / cobertura Isotelha EPS



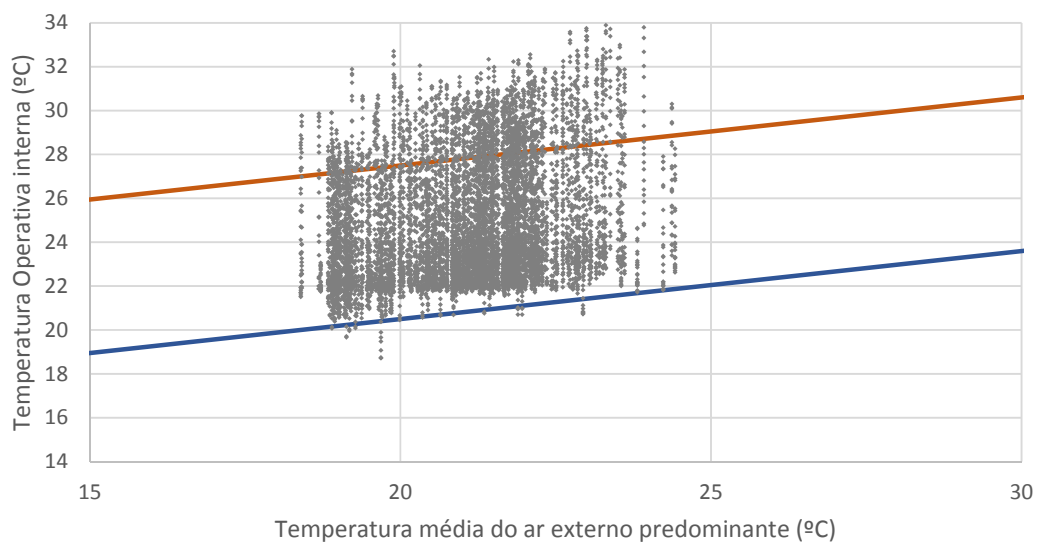
Quarto 2 - parede Monolite / cobertura Isotelha EPS



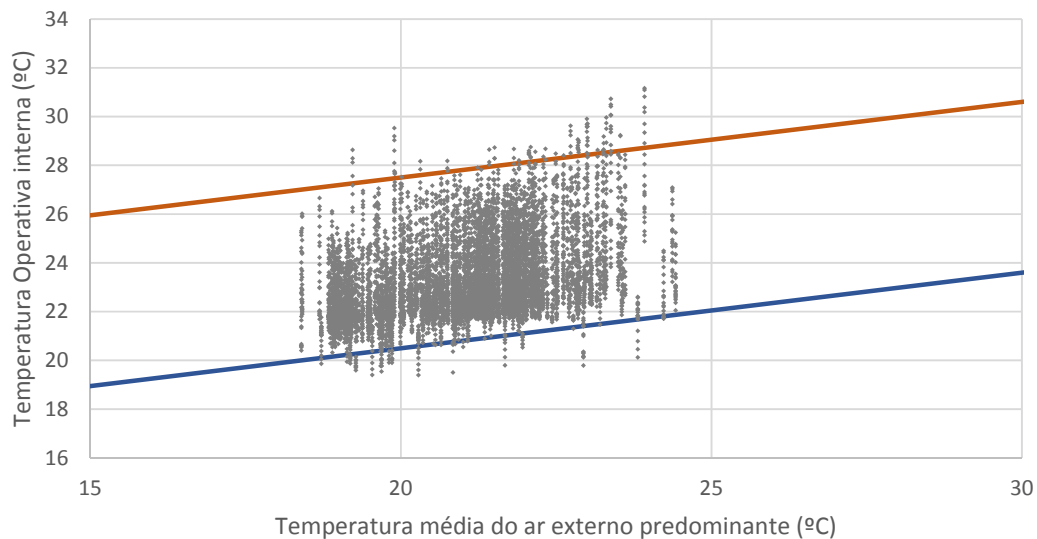
Quarto 3 - parede Monolite / cobertura Isotelha EPS



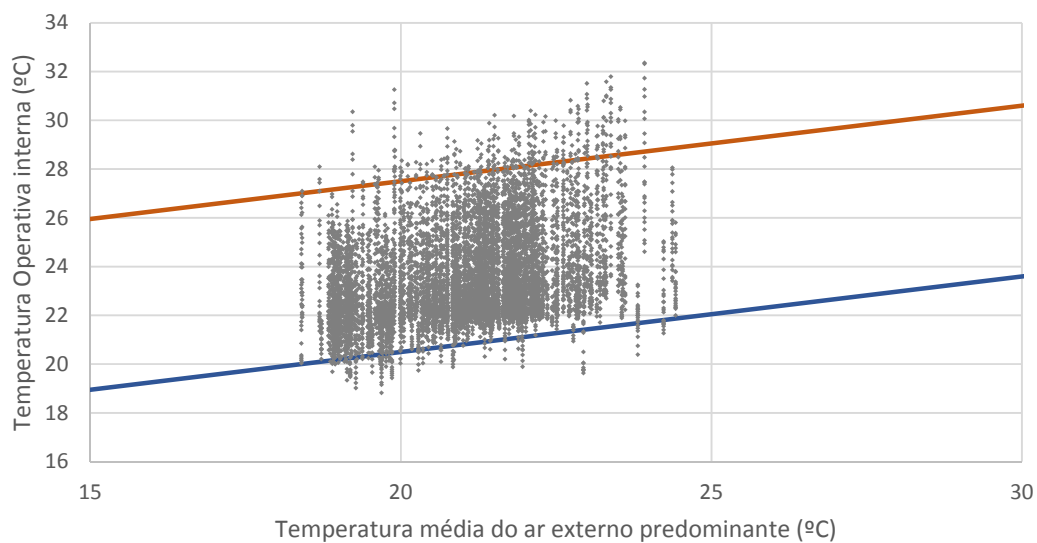
Sala - parede Monolite / cobertura Isotelha EPS



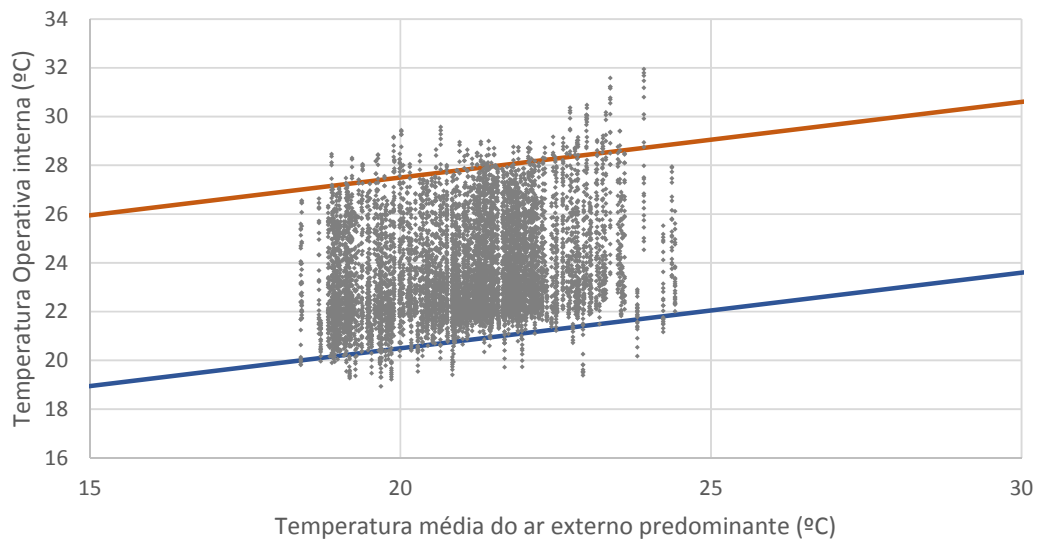
Quarto 1 - parede Monolite / cobertura Isotelha PUR



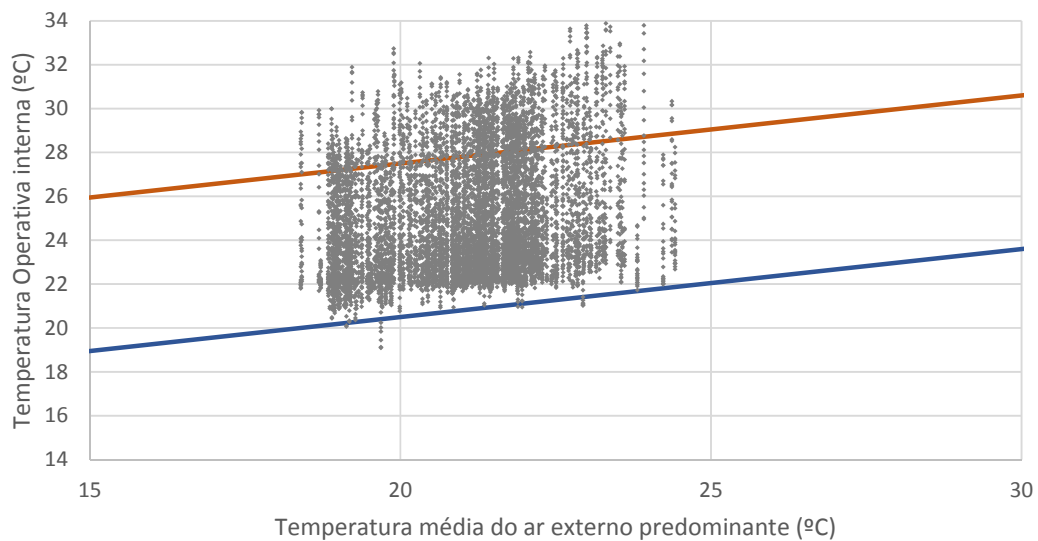
Quarto 2 - parede Monolite / cobertura Isotelha PUR



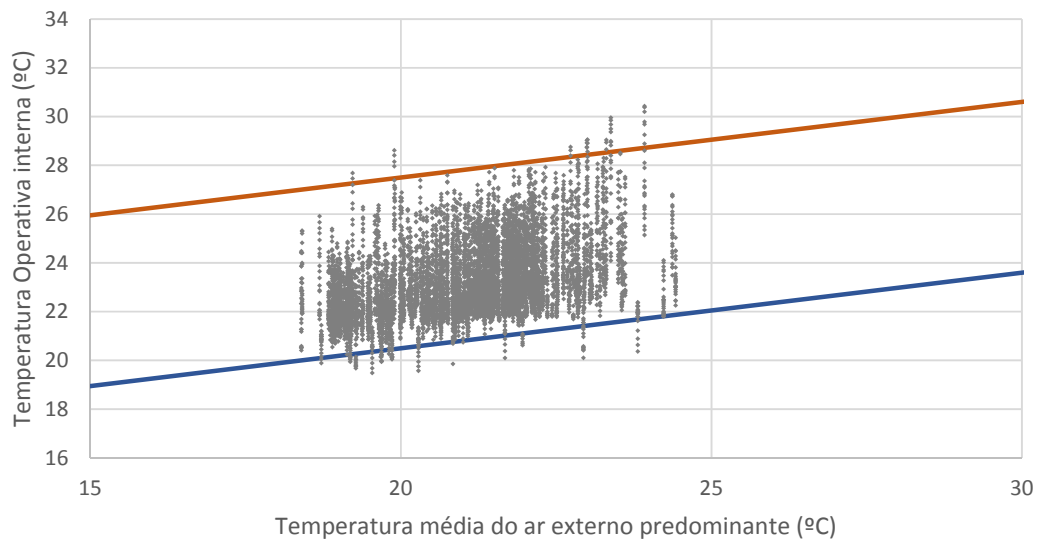
Quarto 3 - parede Monolite / cobertura Isotelha PUR



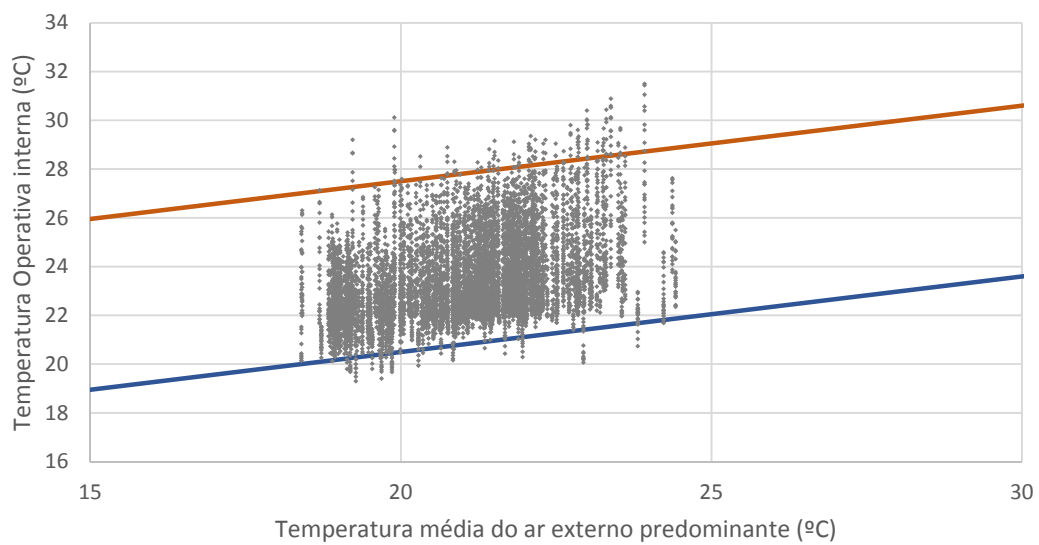
Sala - parede Monolite / cobertura Isotelha PUR



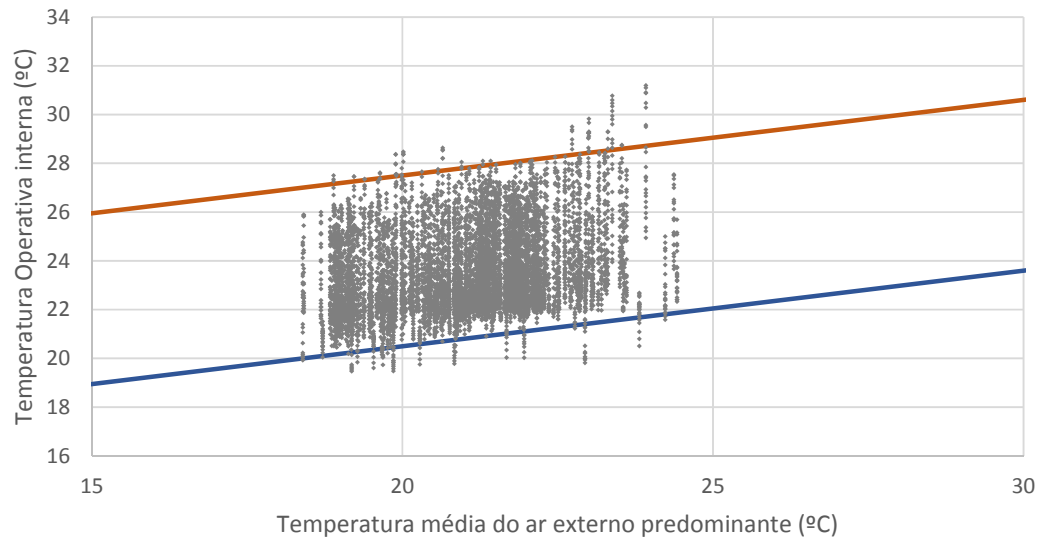
Quarto 1 - parede Monolite / cobertura Laje painel



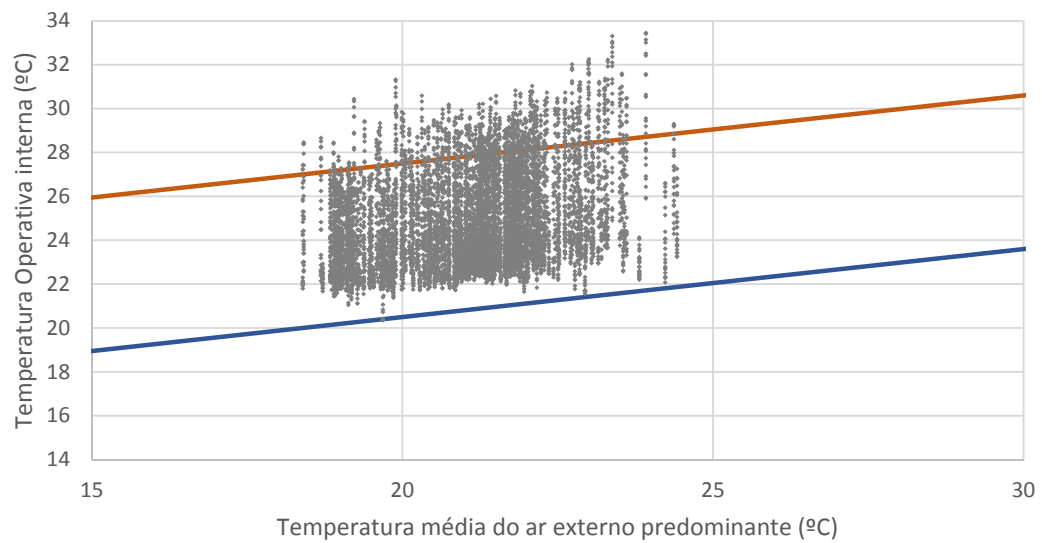
Quarto 2 - parede Monolite / cobertura Laje painel



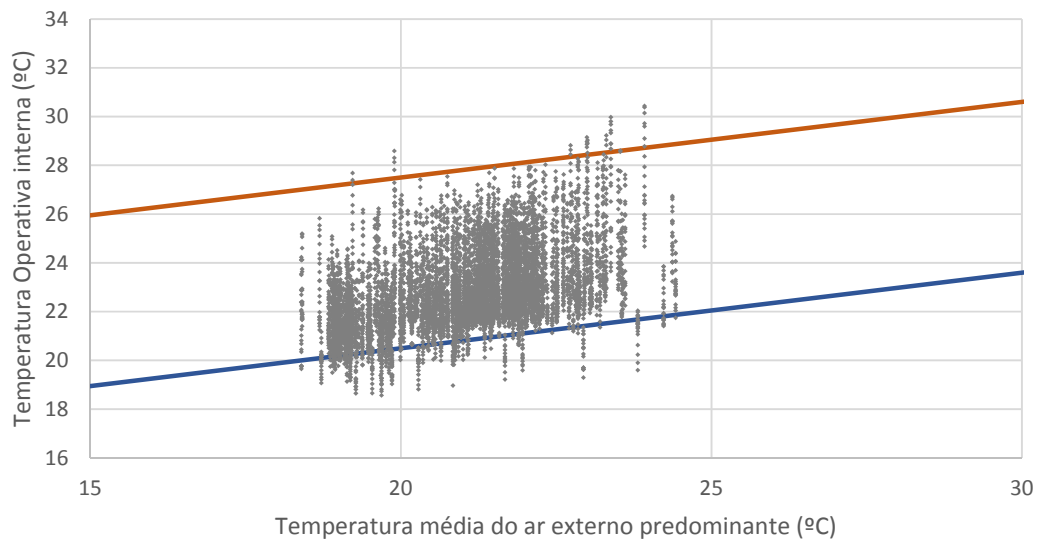
Quarto 3 - parede Monolite / cobertura Laje painel



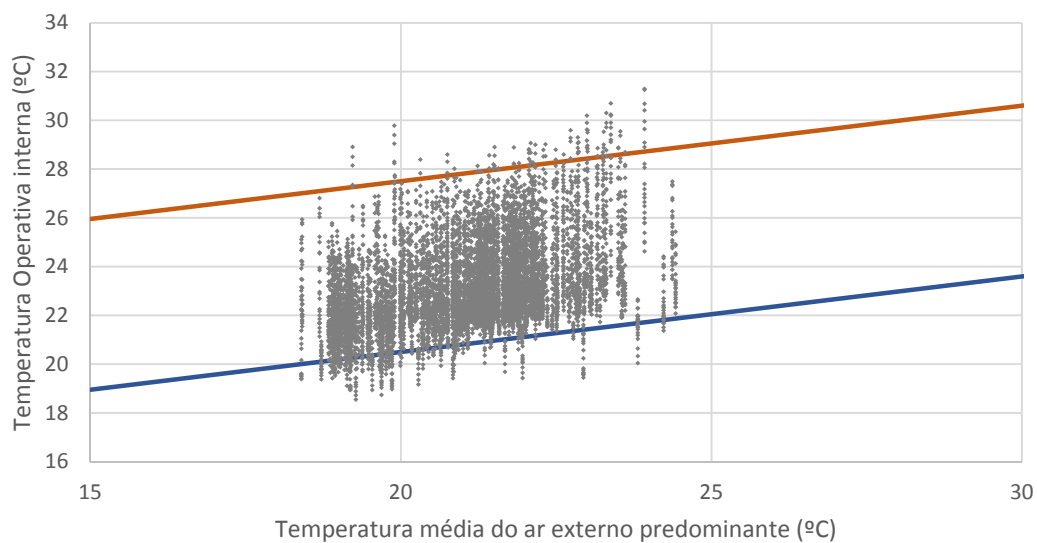
Sala - parede Monolite / cobertura Laje painel

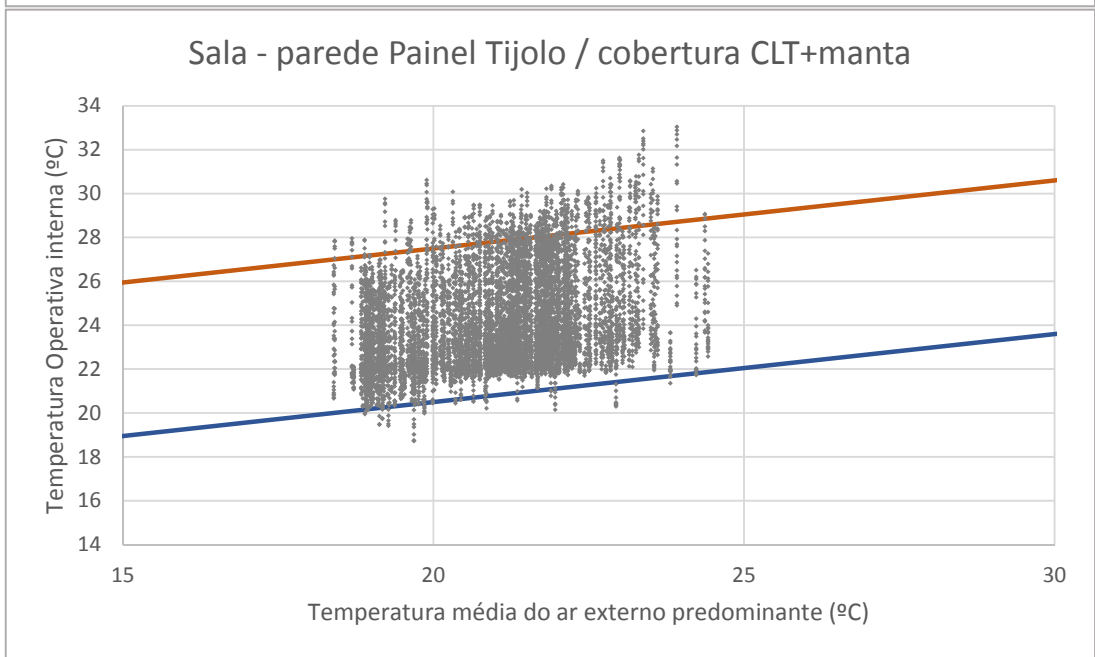
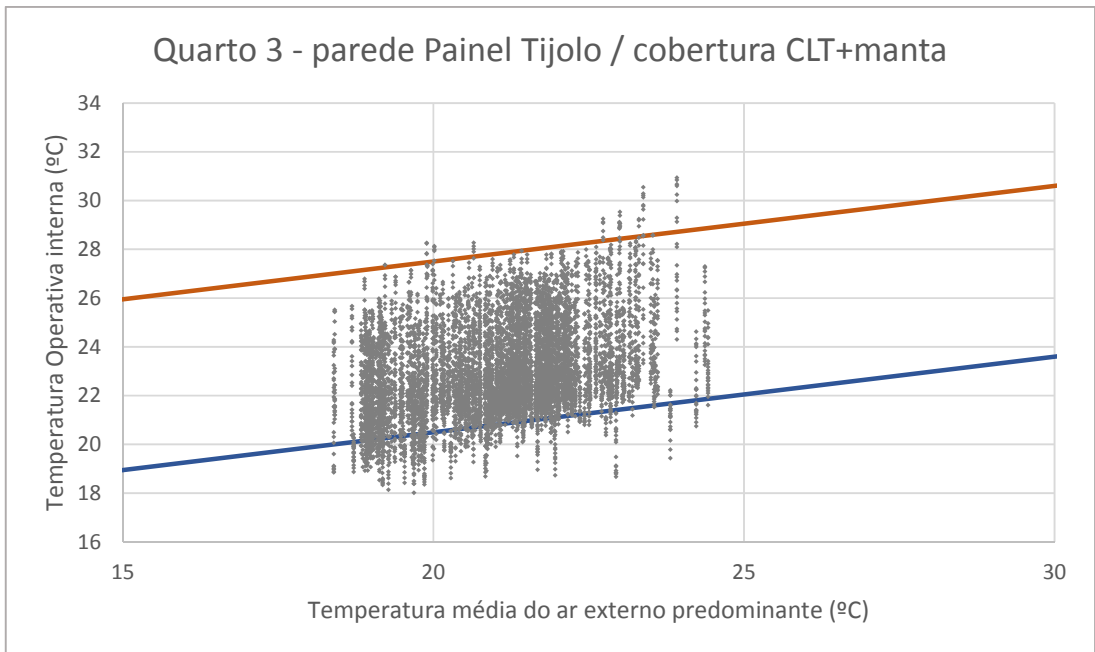


Quarto 1 - parede Painel Tijolo / cobertura CLT+manta

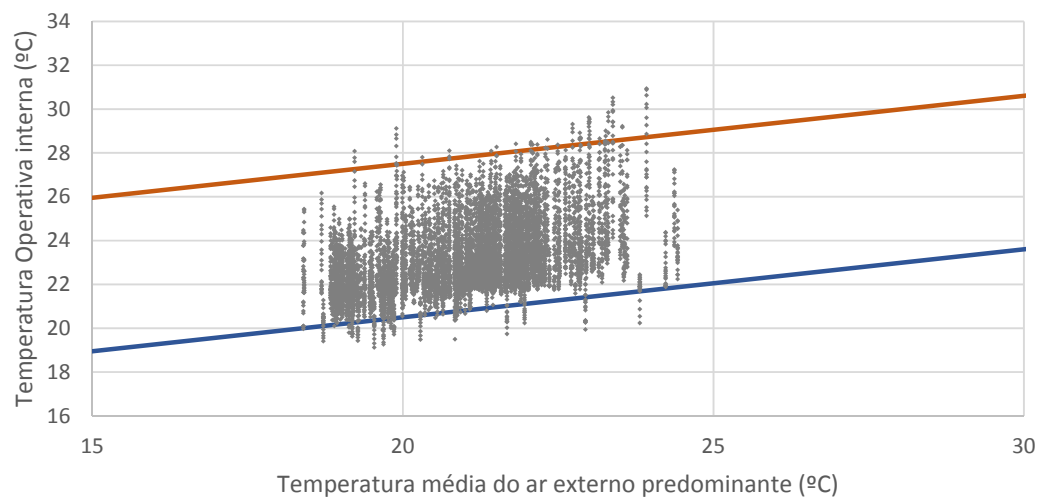


Quarto 2 - parede Painel Tijolo / cobertura CLT+manta

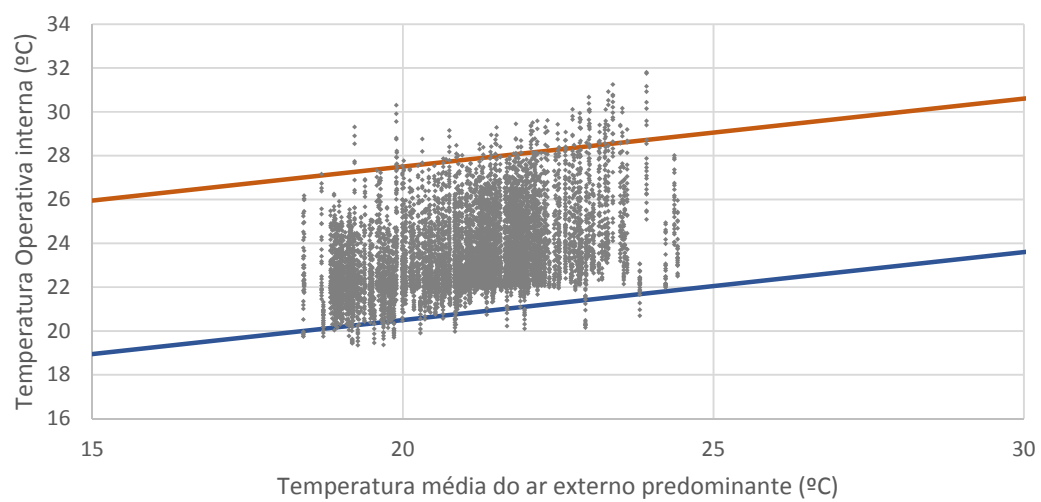




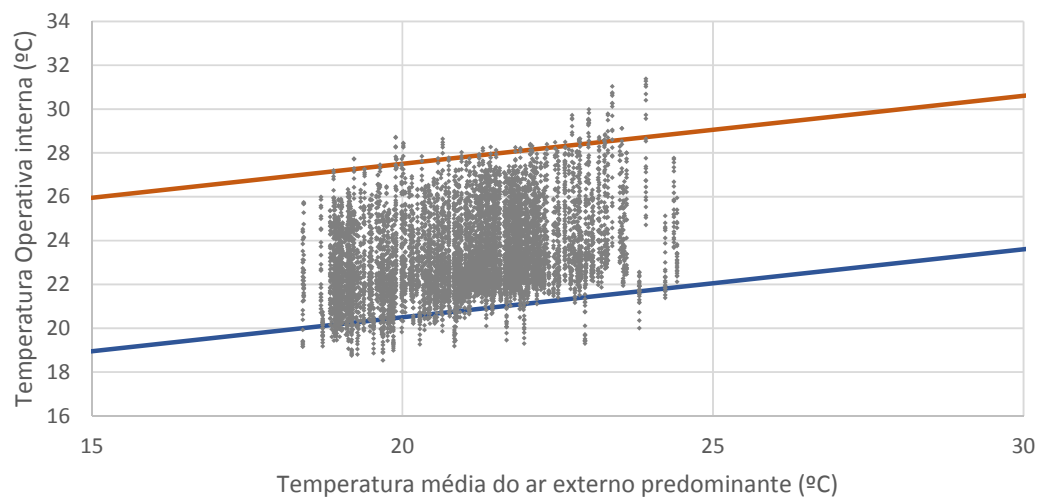
Quarto 1 - parede Painel Tijolo / cobertura CLT+teto verde



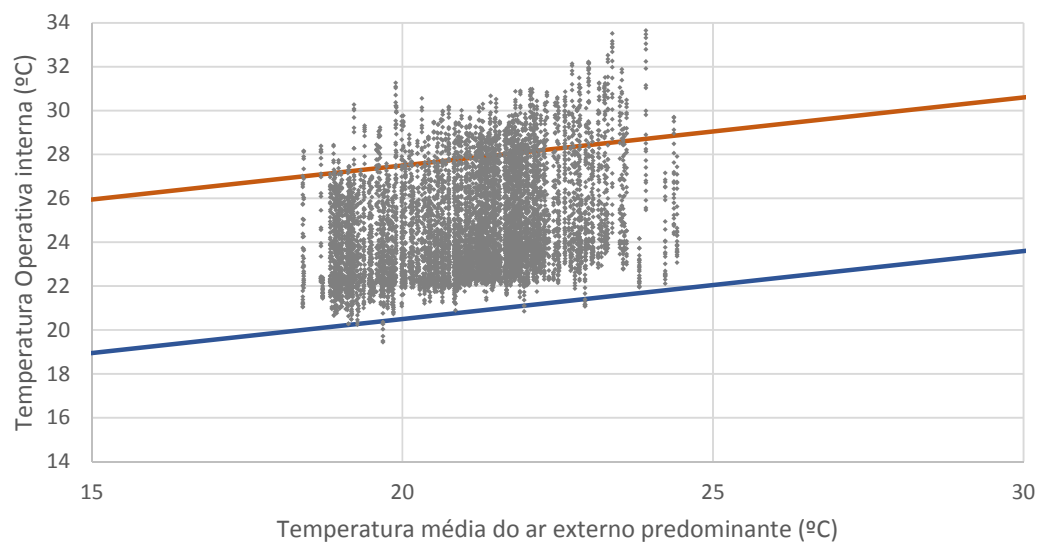
Quarto 2 - parede Painel Tijolo / cobertura CLT+teto verde



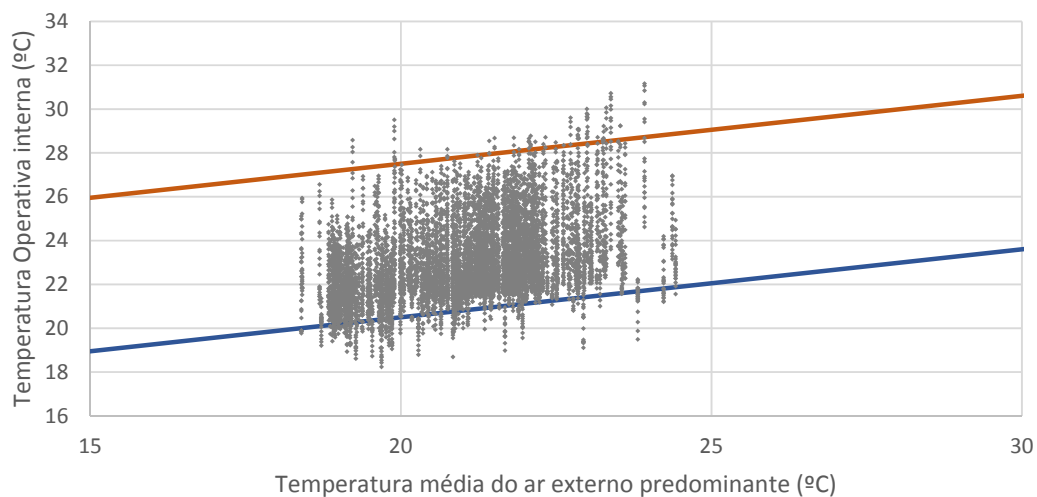
Quarto 3 - parede Painel Tijolo / cobertura CLT+teto verde



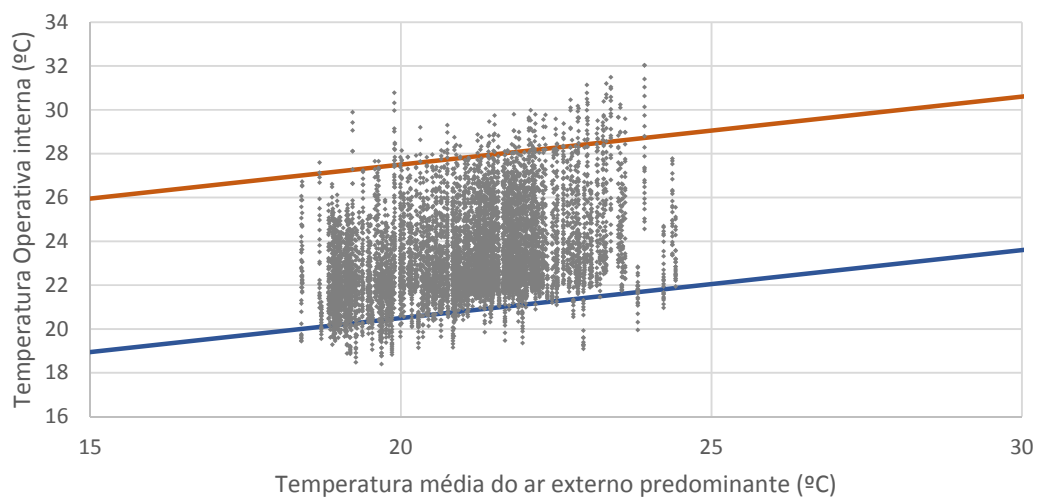
Sala - parede Painel Tijolo / cobertura CLT+teto verde



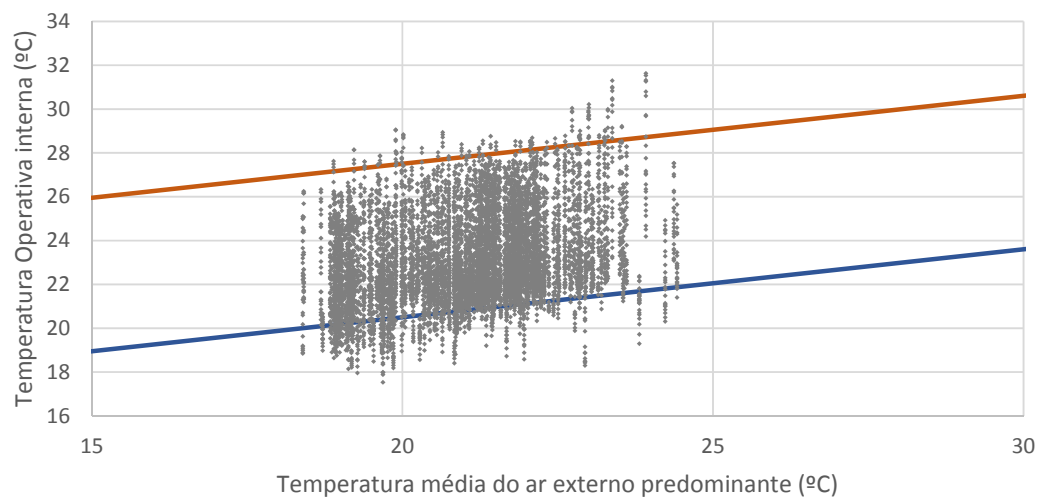
Quarto 1 - parede painel tijolo / cobertura Isotelha EPS



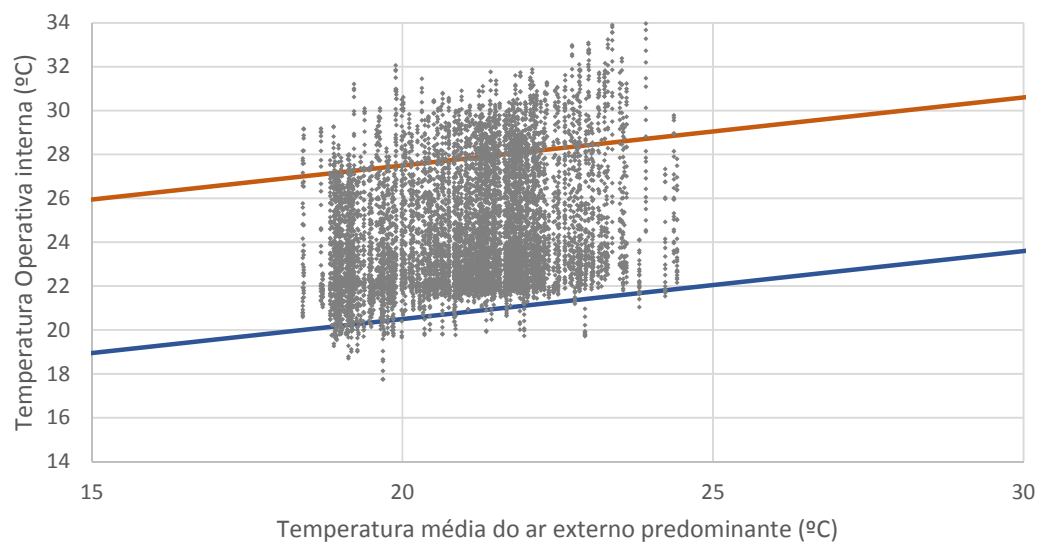
Quarto 2 - parede painel tijolo / cobertura Isotelha EPS



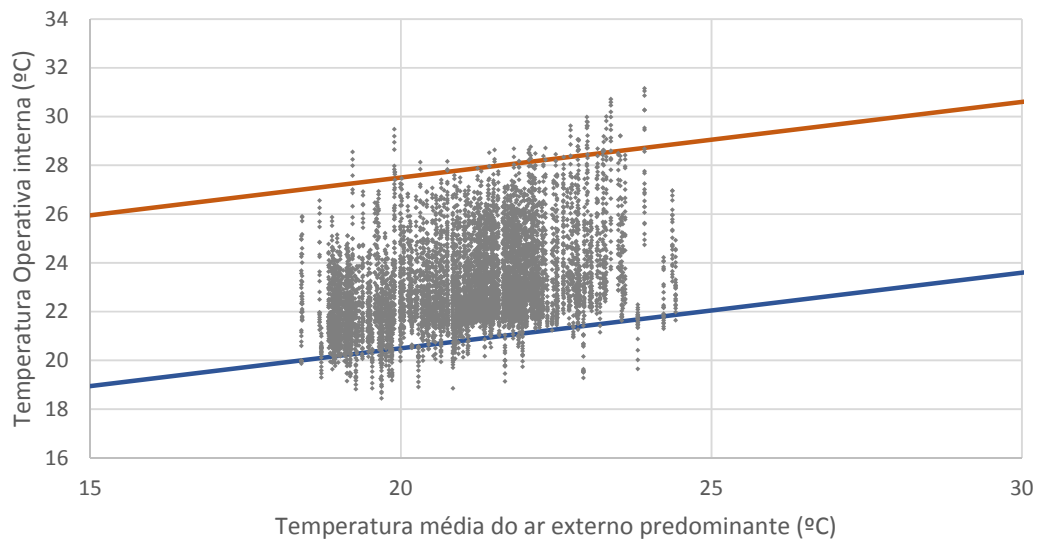
Quarto 3 - parede painel tijolo / cobertura Isotelha EPS



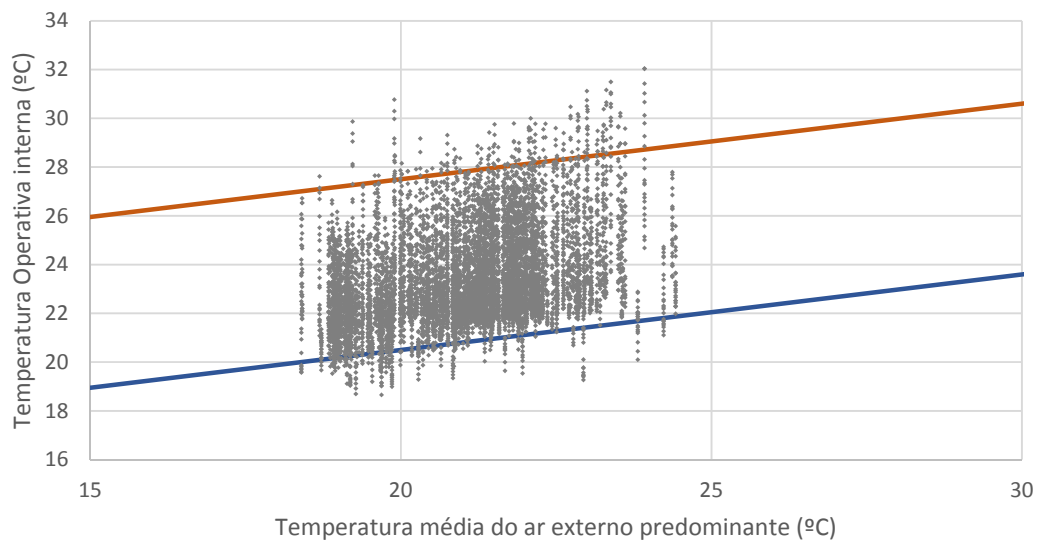
Sala - parede painel tijolo / cobertura Isotelha EPS

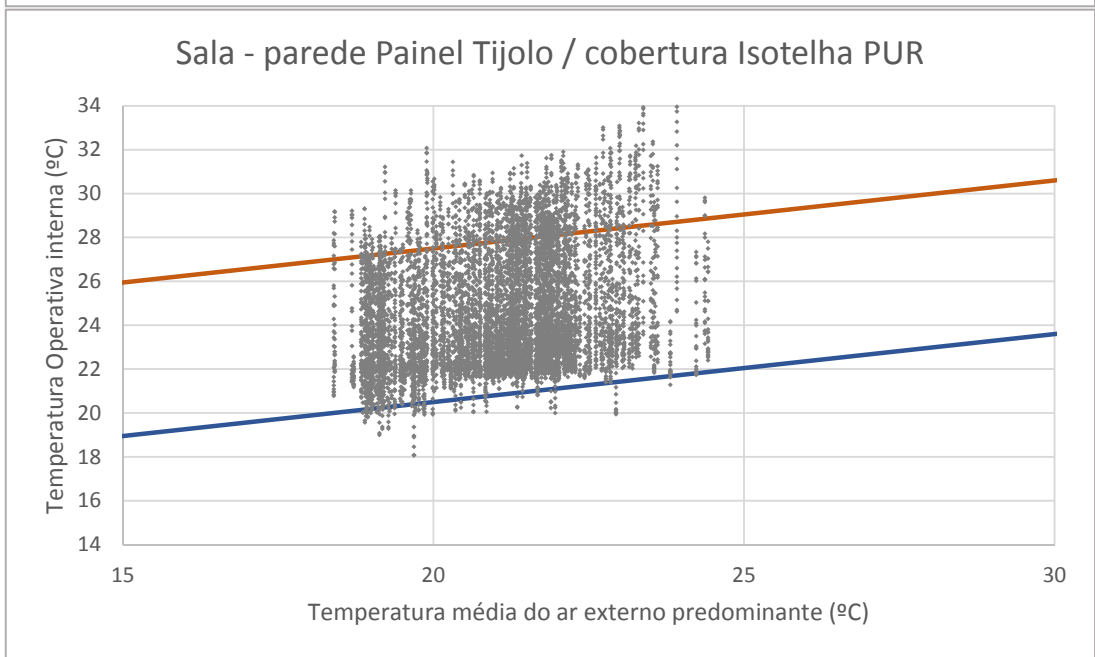
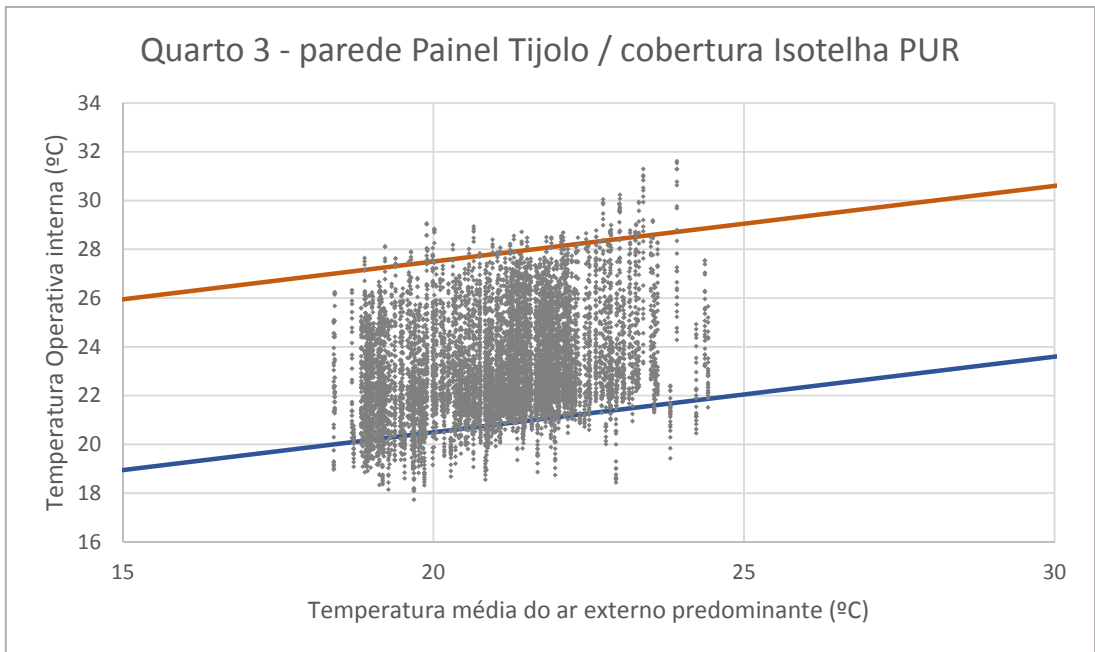


Quarto 1 - parede Painel Tijolo / cobertura Isotelha PUR

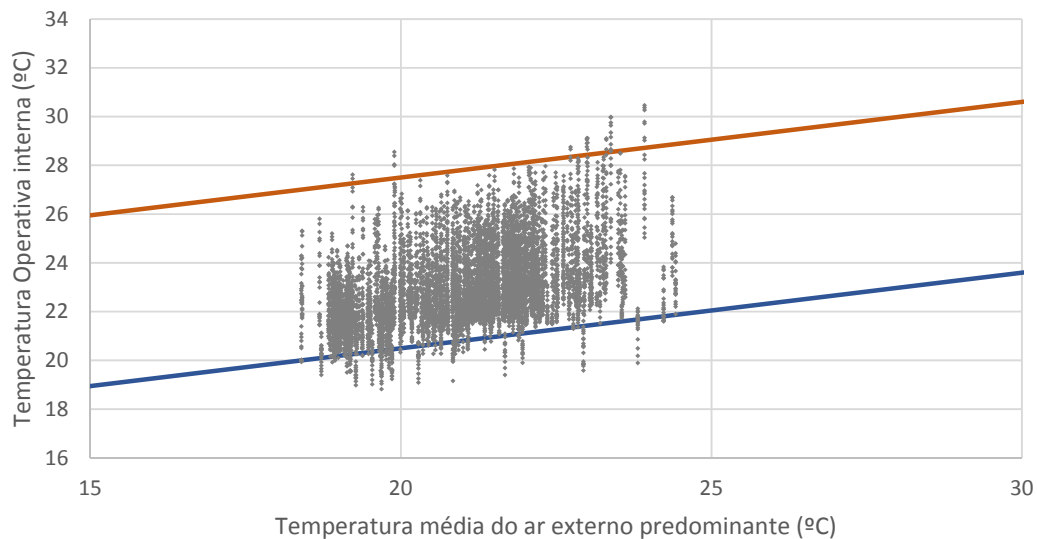


Quarto 2 - parede Painel Tijolo / cobertura Isotelha PUR

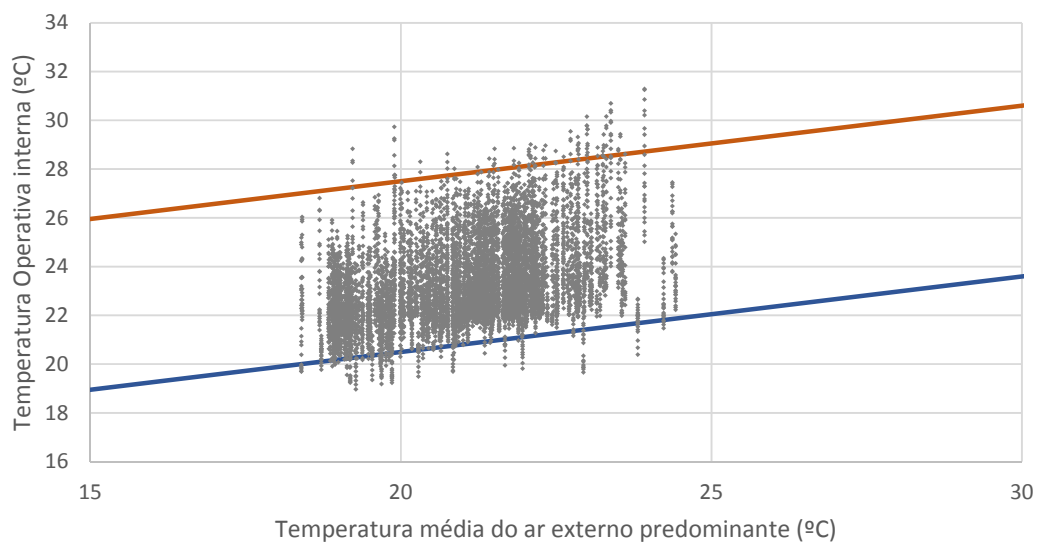




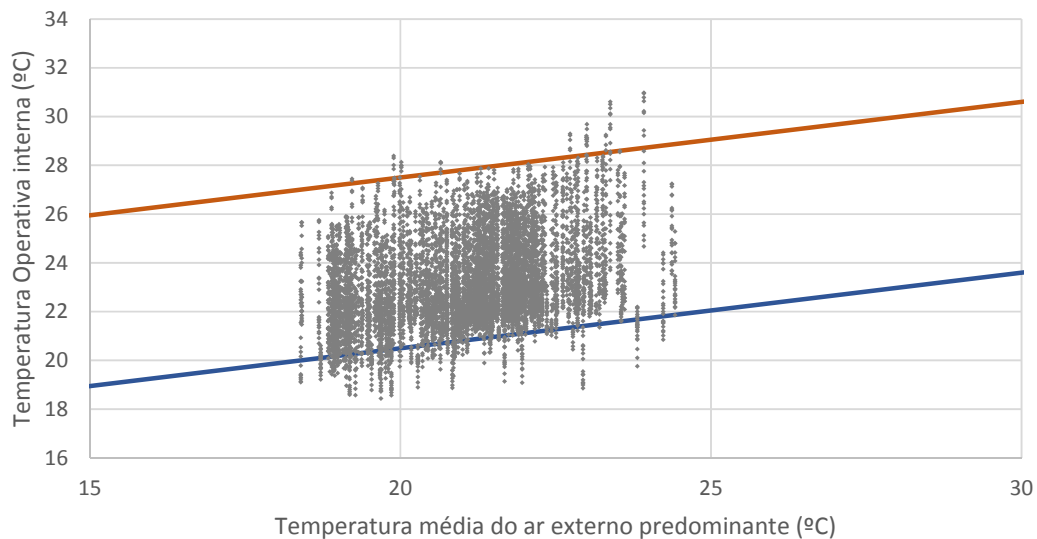
Quarto 1 - parede Painel Tijolo / cobertura Isotelha PUR



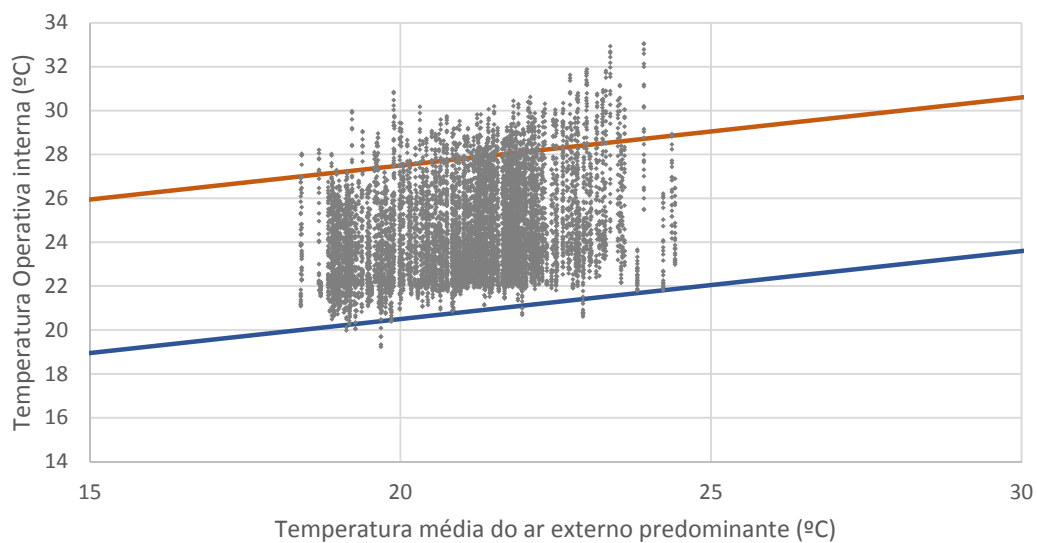
Quarto 2 - parede Painel Tijolo / cobertura Isotelha PUR



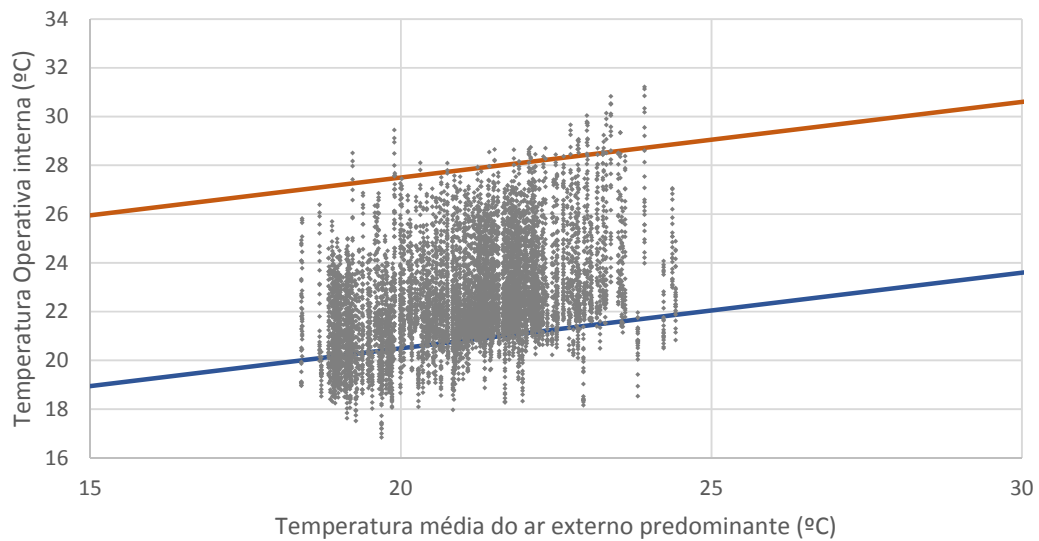
Quarto 3 - parede Painel Tijolo / cobertura Isotelha PUR



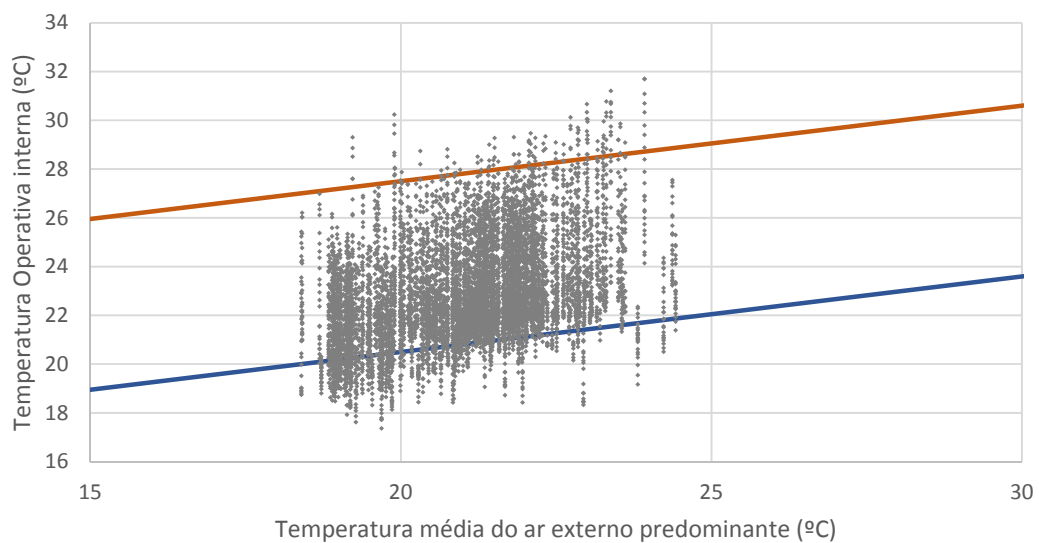
Sala - parede Painel Tijolo / cobertura Isotelha PUR

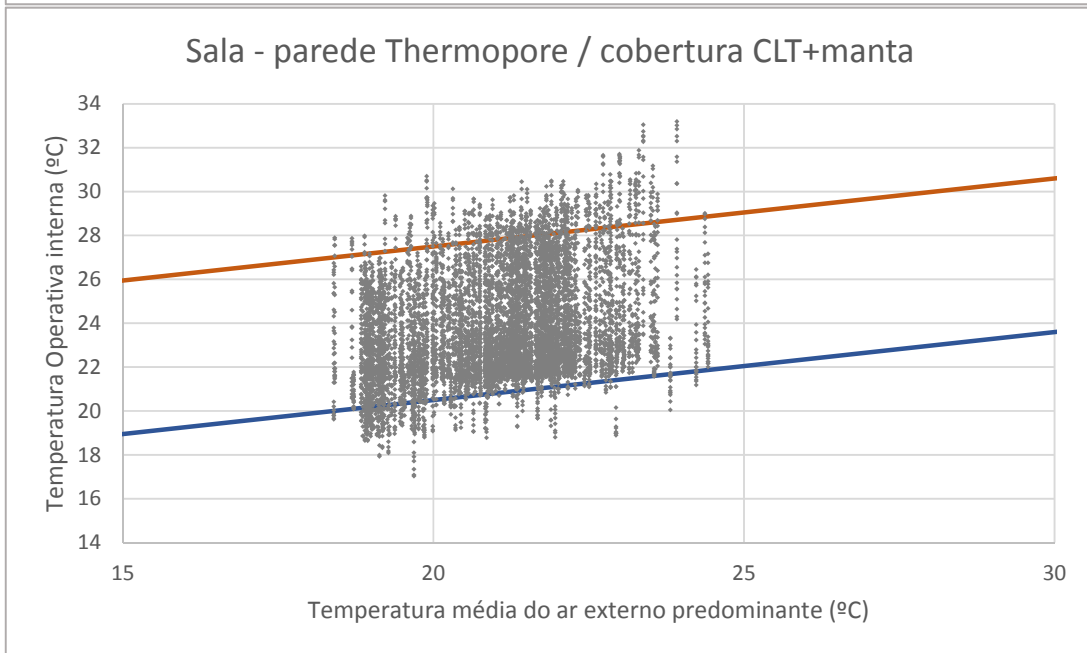
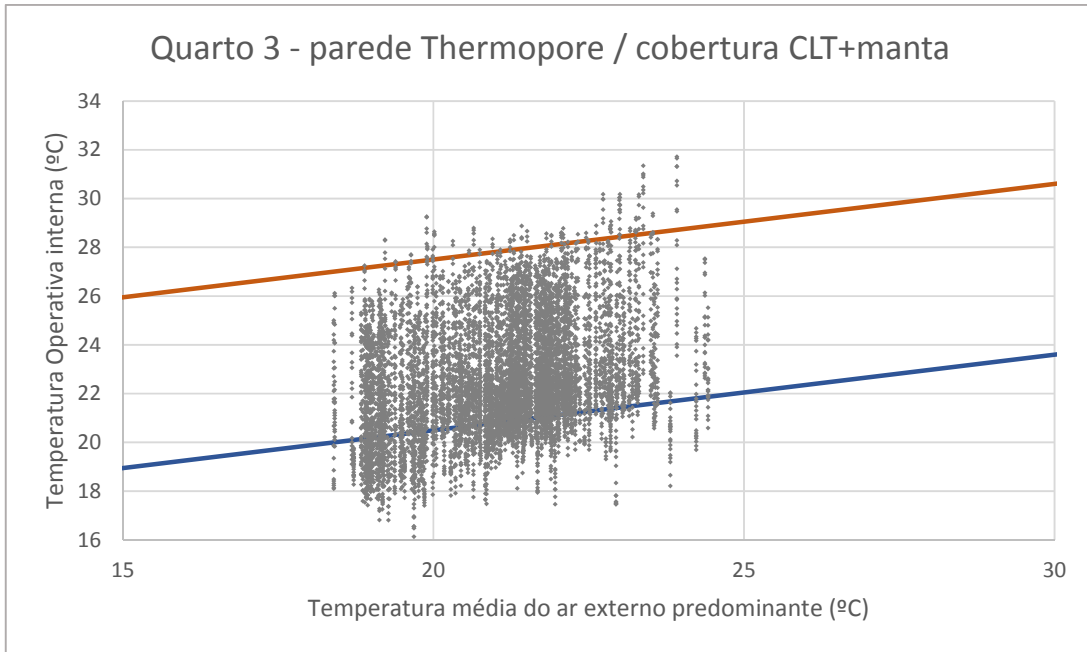


Quarto 1 - parede Thermopore / cobertura CLT+manta

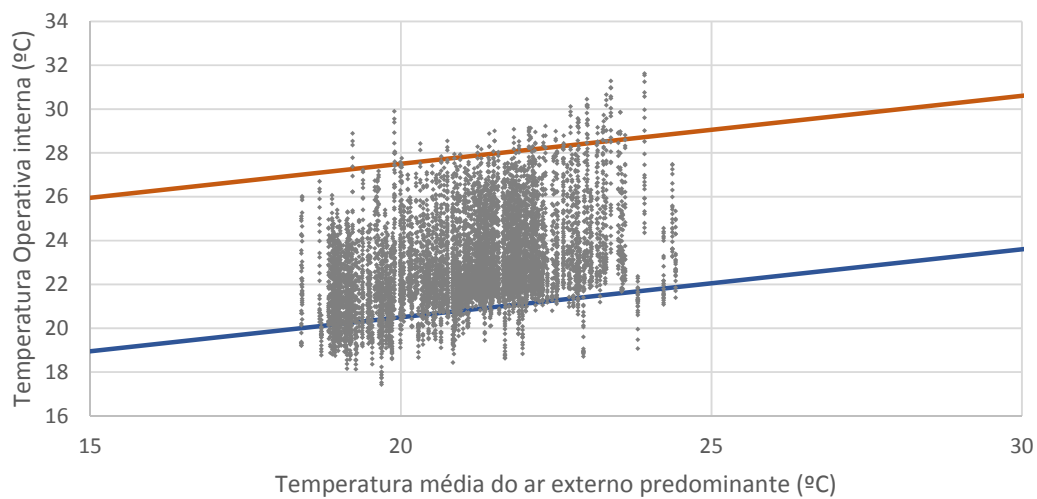


Quarto 2 - parede Thermopore / cobertura CLT+manta

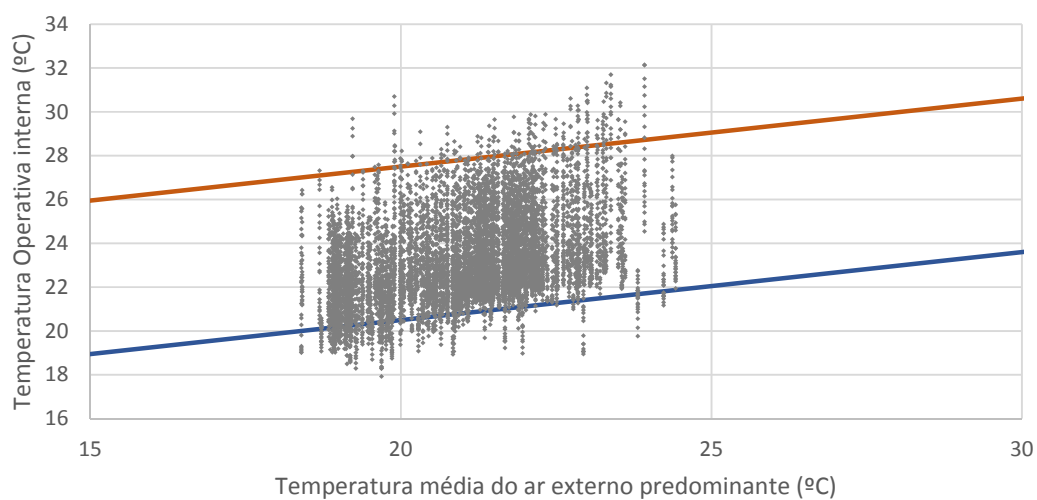




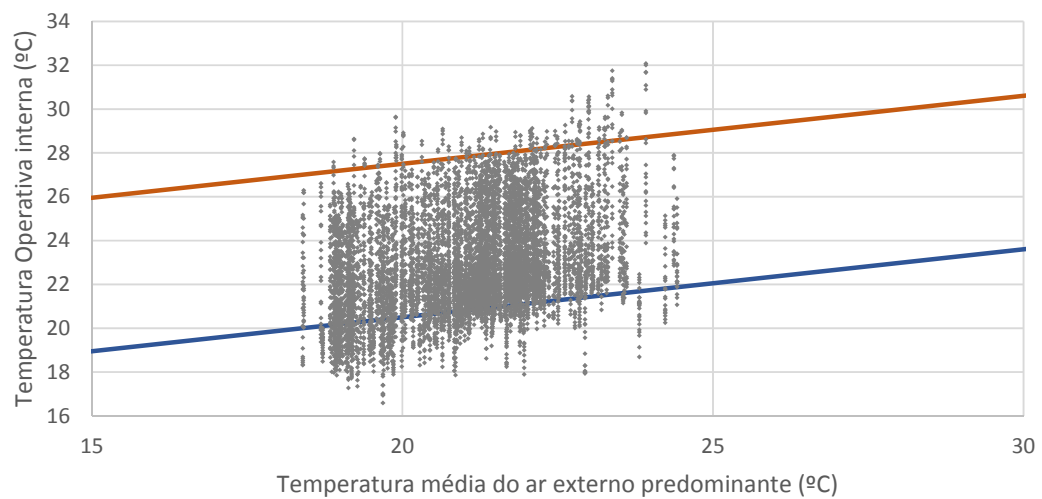
Quarto 1 - parede Thermopore / cobertura CLT+teto verde



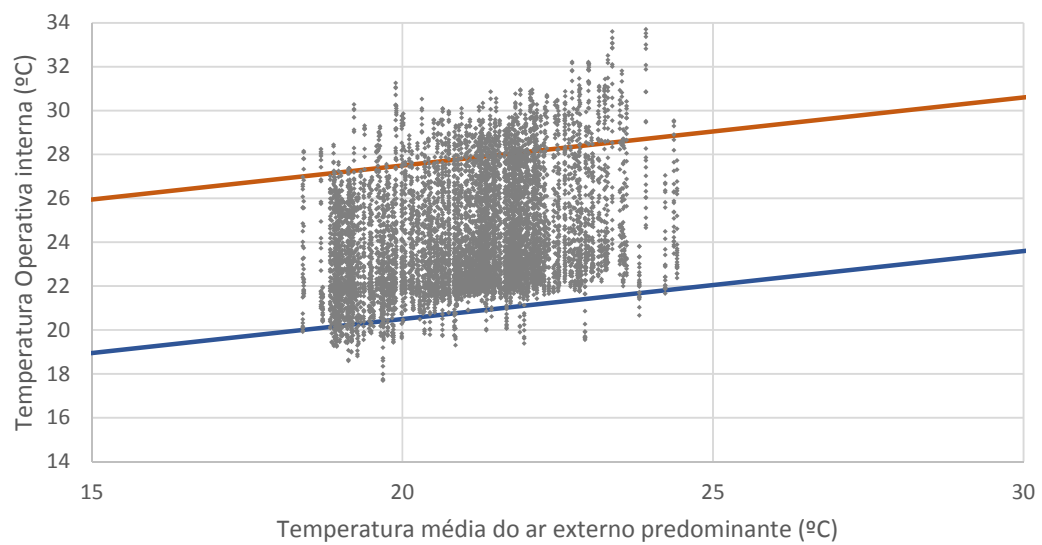
Quarto 2 - parede Thermopore / cobertura CLT+teto verde



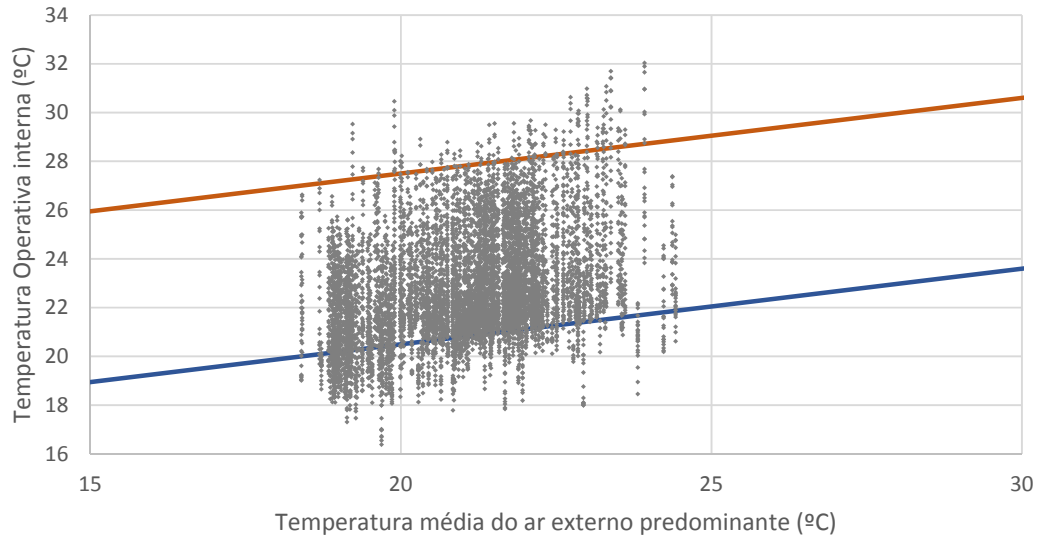
Quarto 3 - parede Thermopore / cobertura CLT+teto verde



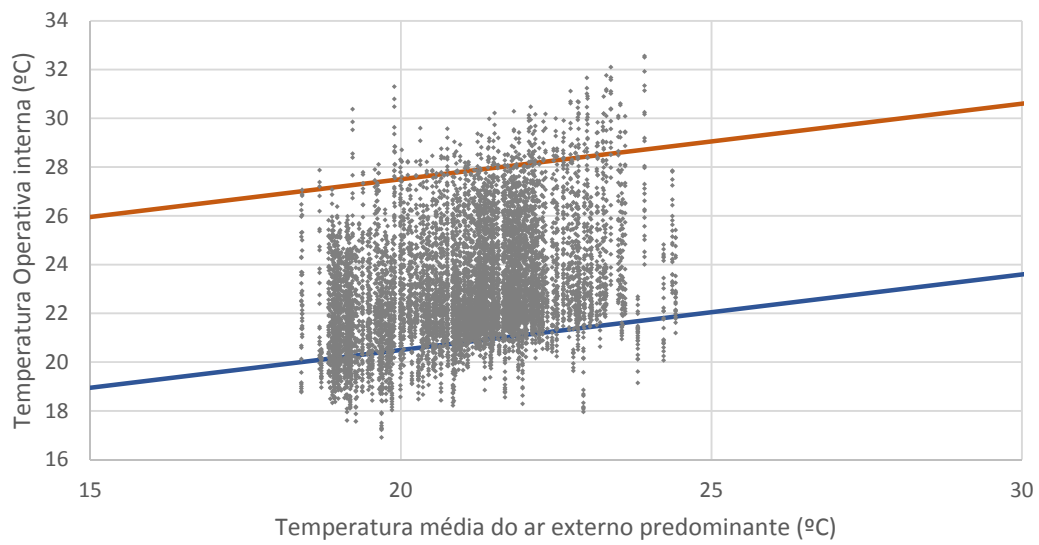
Sala - parede Thermopore / cobertura CLT+teto verde

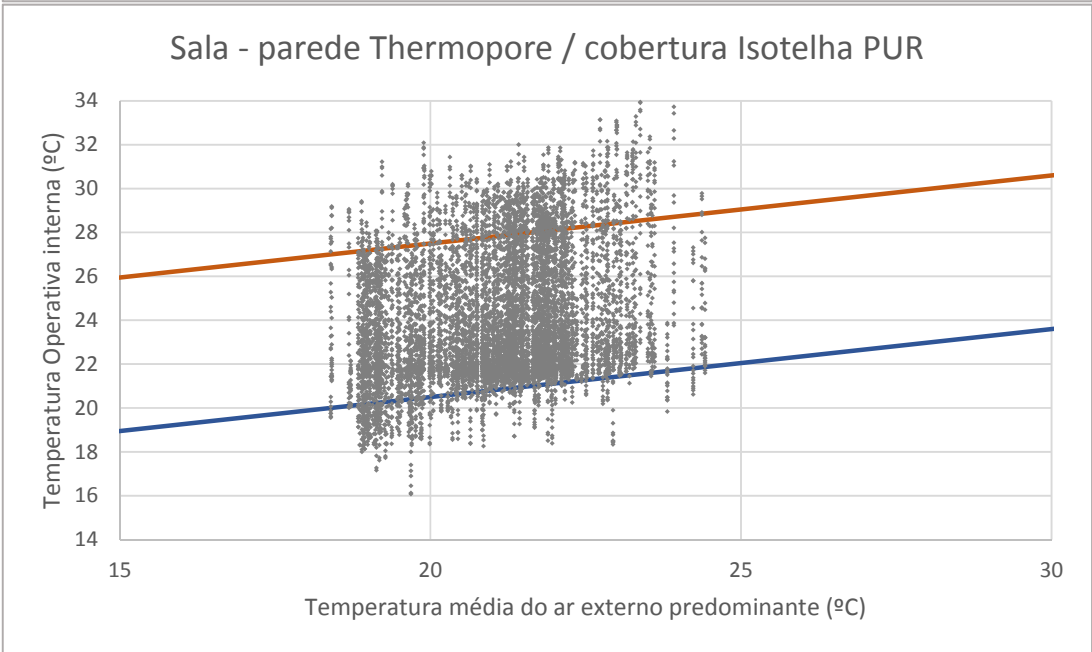
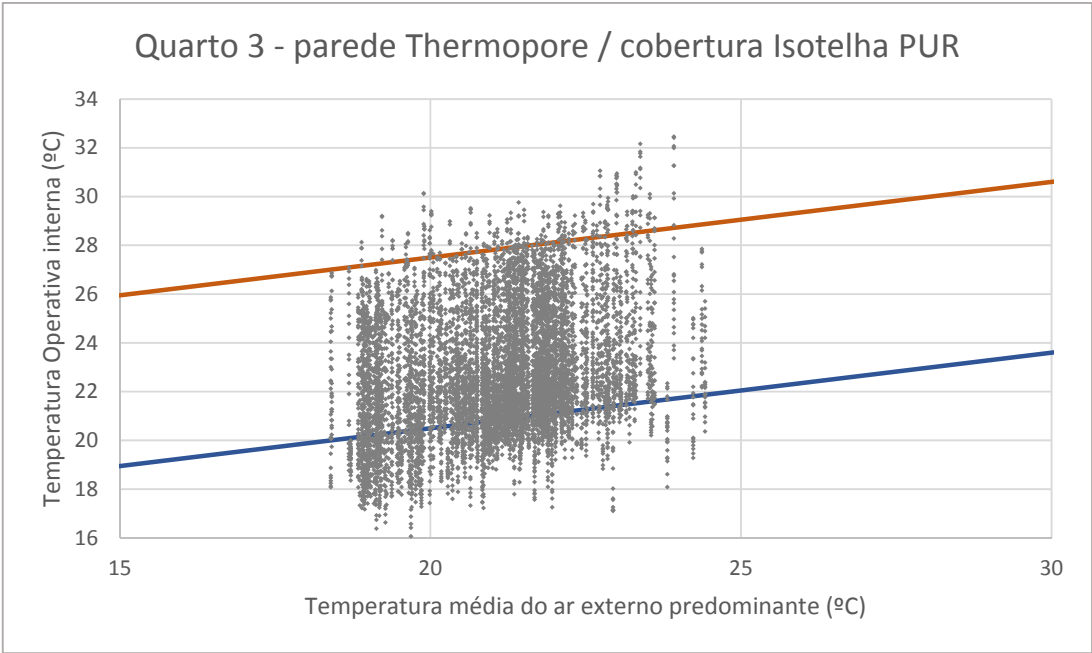


Quarto 1 - parede Thermopore / cobertura Isotelha PUR

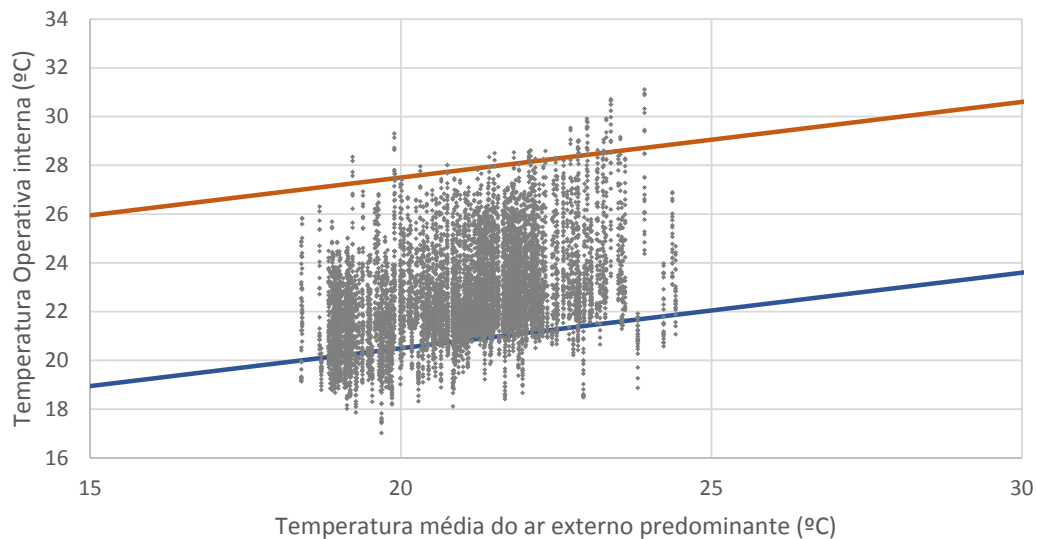


Quarto 2 - parede Thermopore / cobertura Isotelha PUR

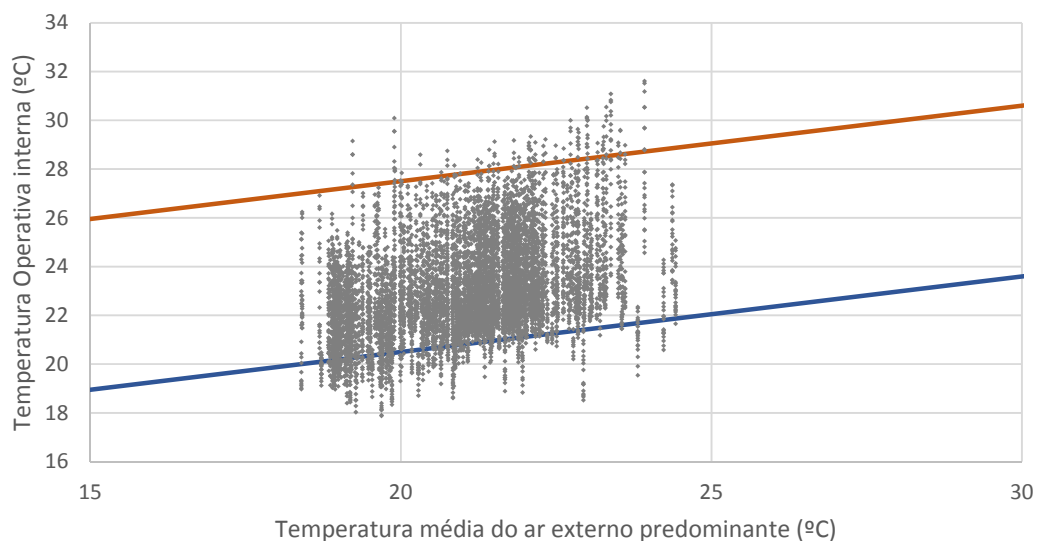


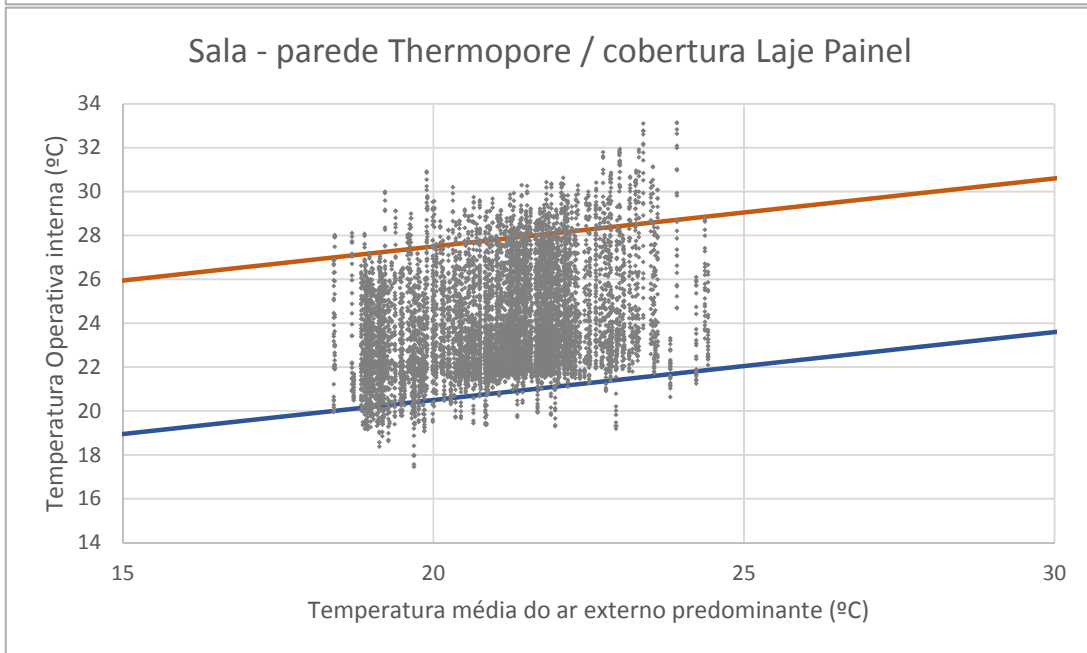
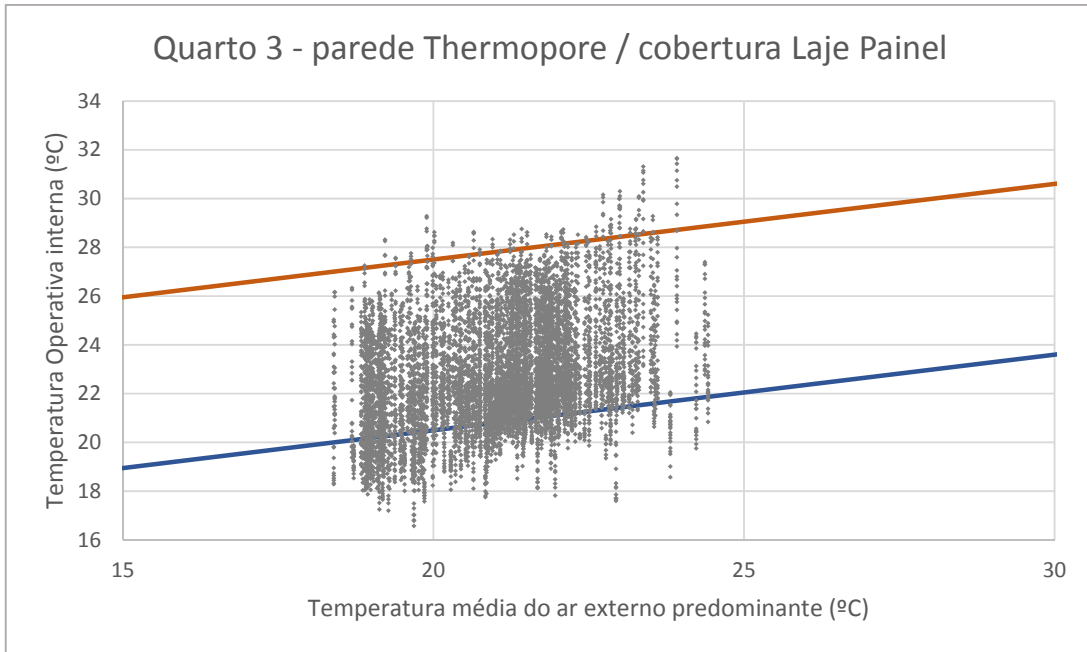


Quarto 1 - parede Thermopore / cobertura Laje Painei

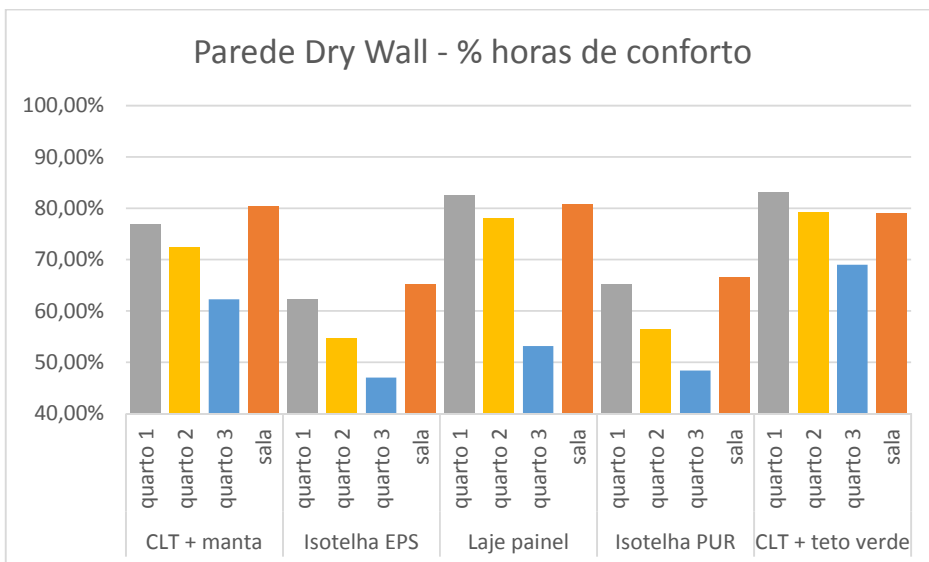
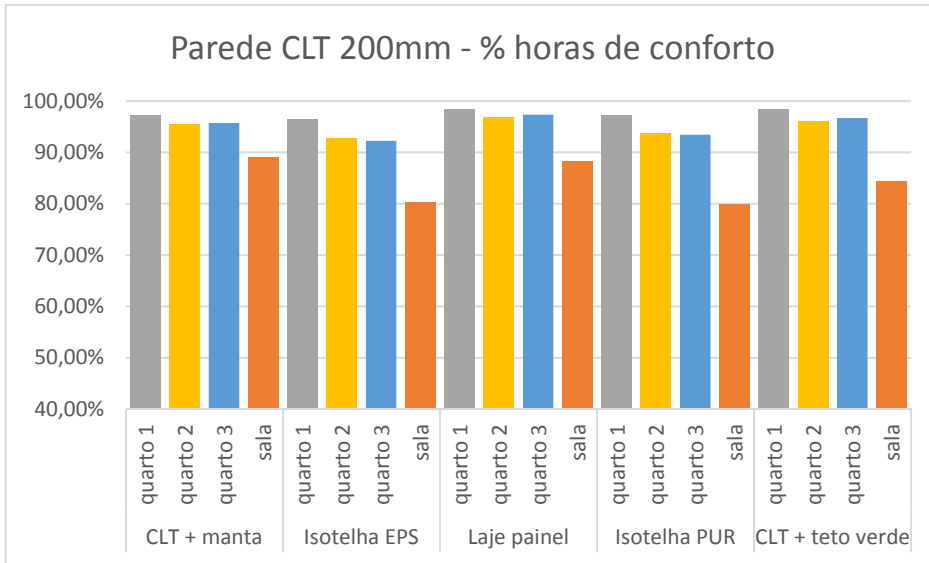


Quarto 2 - parede Thermopore / cobertura Laje Painei

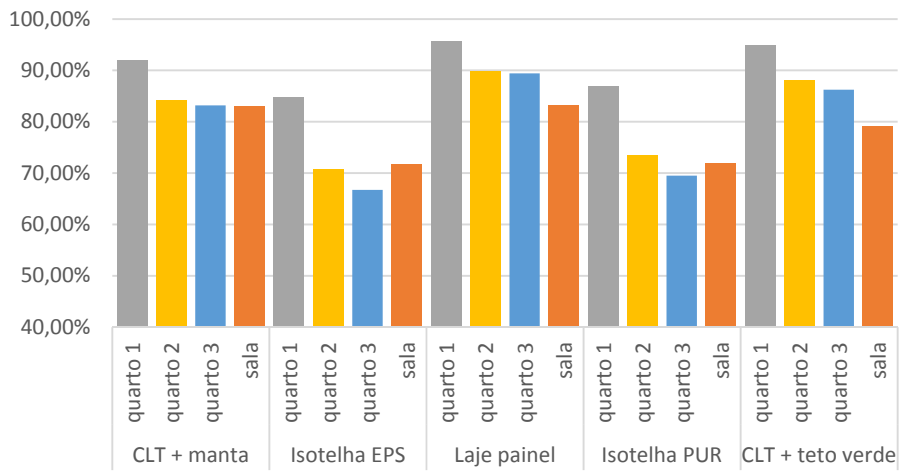




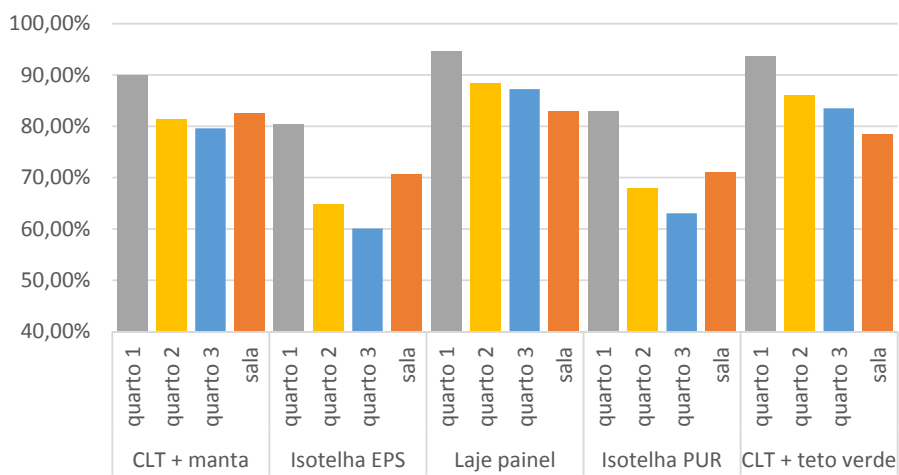
APÊNDICE II – Resultados dos percentuais de horas de conforto

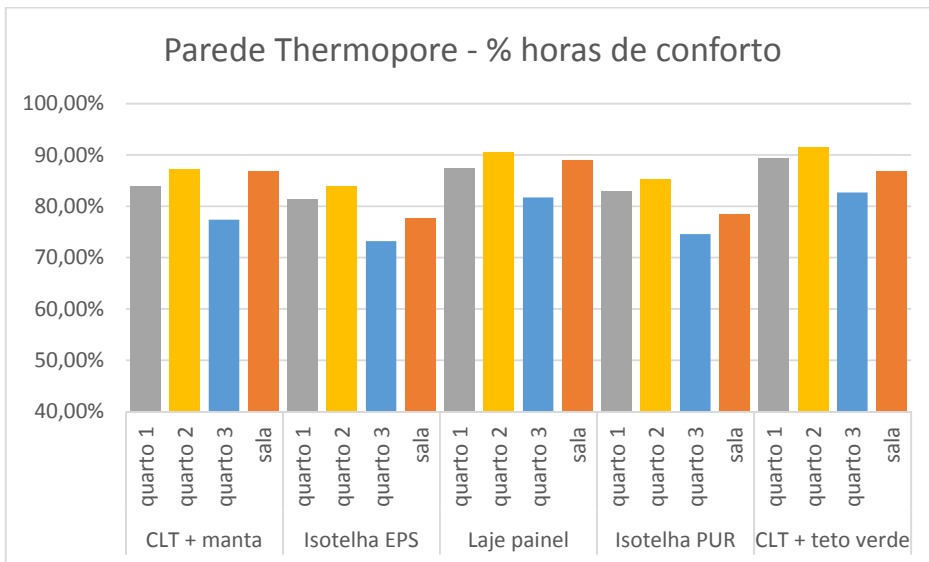
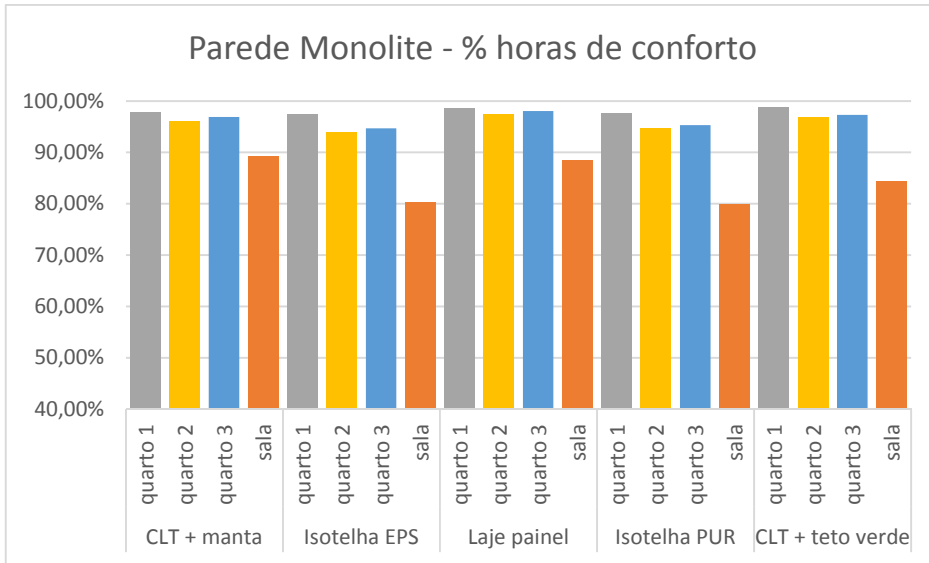


Parede LDR - % horas de conforto

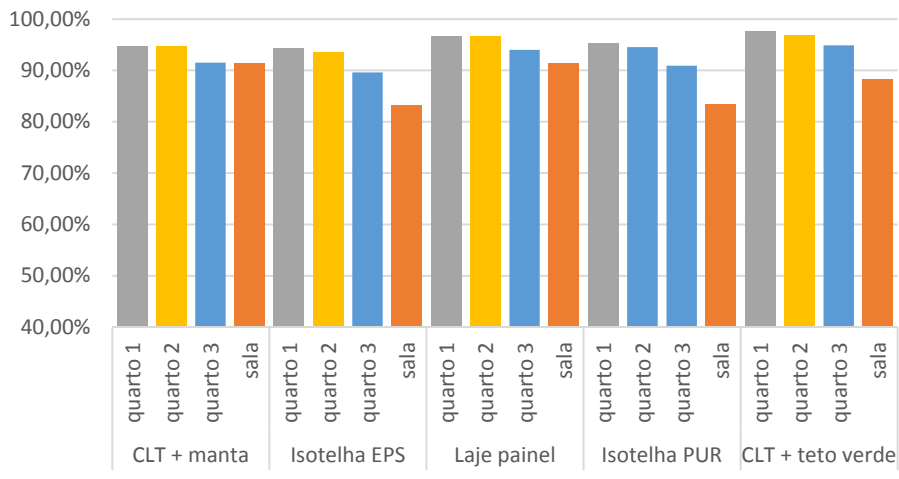


Parede Isofachada PUR - % horas de conforto



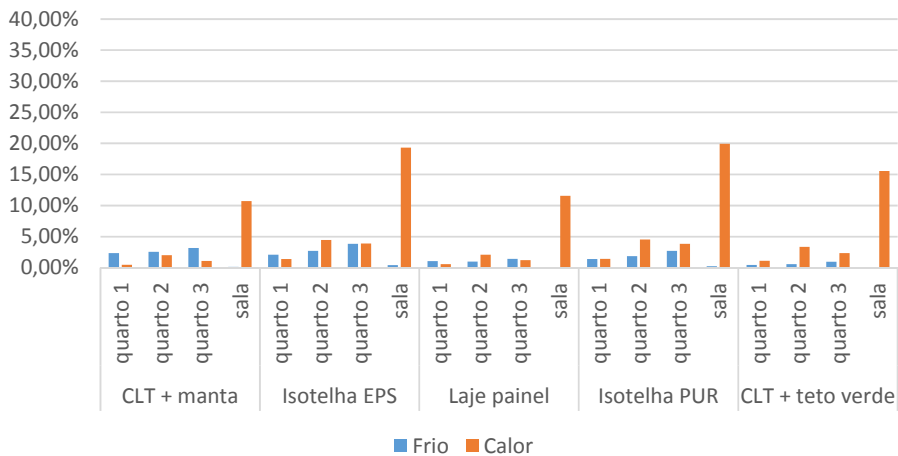


Parede Painel Tijolo - % horas de conforto

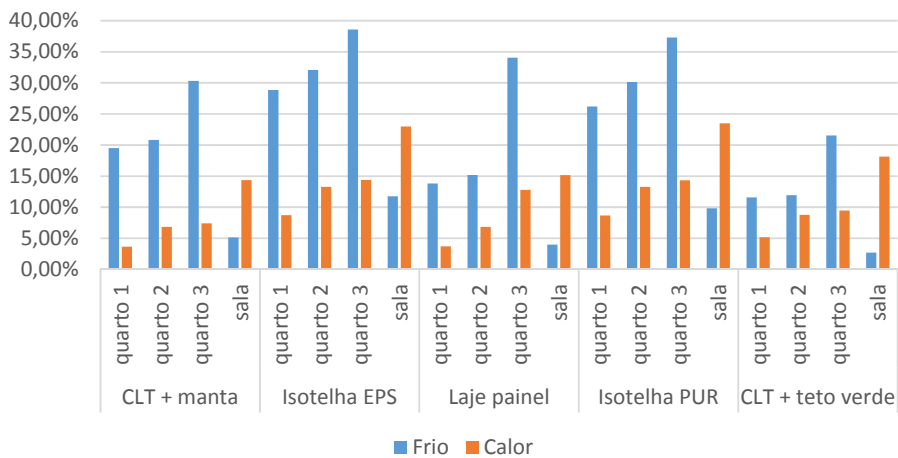


**APÊNDICE III – Resultados dos percentuais de horas de desconforto
por frio e por calor**

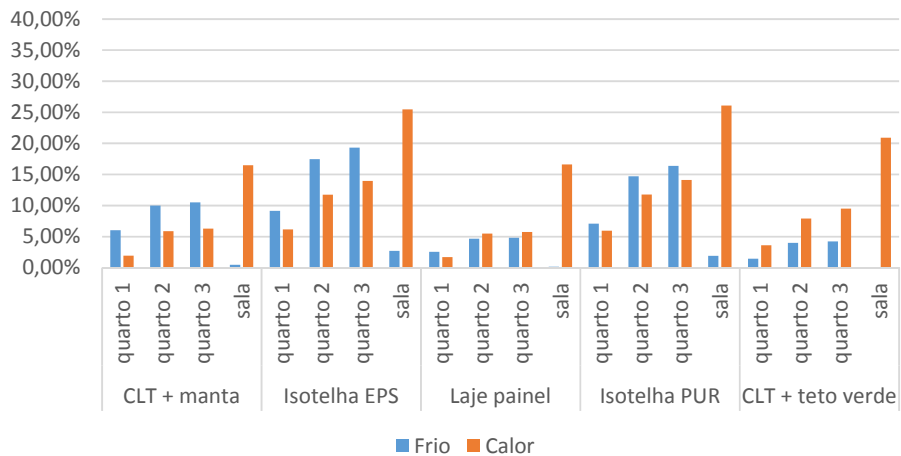
Parede CLT 200mm - % horas de desconforto



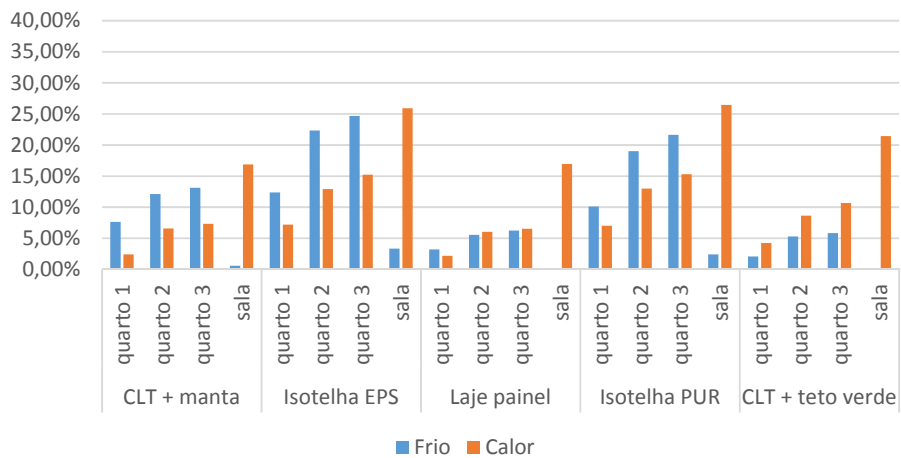
Parede Dry Wall - % horas de desconforto



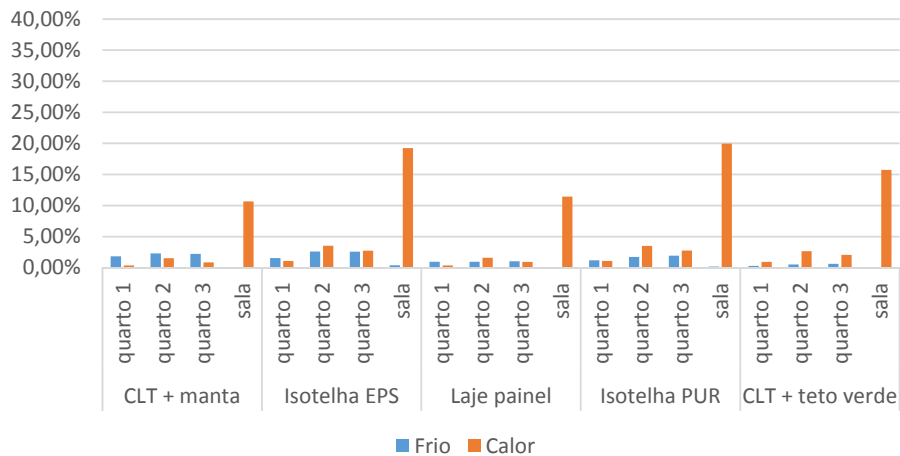
Parede LDR - % horas de desconforto



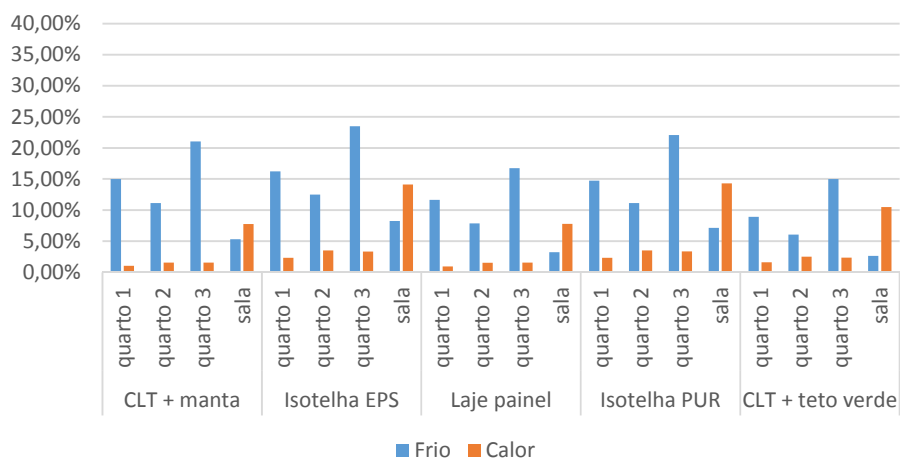
Parede Isofachada PUR - % horas de desconforto



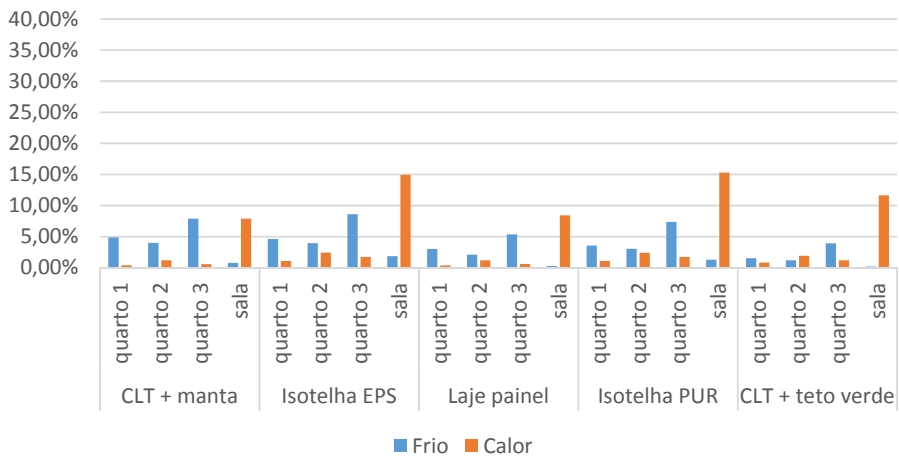
Parede Monolite - % horas de desconforto



Parede Thermopore - % horas de desconforto



Parede Painel Tijolo - % horas de desconforto



**APÊNDICE IV – Cálculo de consumo de energia elétrica por ar
condicionado para cada combinação de material de cobertura e
parede por ambiente**

parede / cobertura	ambiente	Total hora desconforto calor	Potência (W)	Consumo Anual (kWh)	Soma todos os ambientes
CLT+manta / CLT 200mm	quarto 1	42	1600	67,2	
CLT+manta / CLT 200mm	quarto 2	176	815	143,44	
CLT+manta / CLT 200mm	quarto 3	95	815	77,425	
CLT+manta / CLT 200mm	sala	940	3200	3008	3296,065
Isotelha EPS / CLT 200mm	quarto 1	124	1600	198,4	
Isotelha EPS / CLT 200mm	quarto 2	392	815	319,48	
Isotelha EPS / CLT 200mm	quarto 3	341	815	277,915	
Isotelha EPS / CLT 200mm	sala	1692	3200	5414,4	6210,195
Laje Painei / CLT 200mm	quarto 1	51	1600	81,6	
Laje Painei / CLT 200mm	quarto 2	183	815	149,145	
Laje Painei / CLT 200mm	quarto 3	108	815	88,02	
Laje Painei / CLT 200mm	sala	1015	3200	3248	3566,765
Isotelha PUR / CLT 200mm	quarto 1	125	1600	200	
Isotelha PUR / CLT 200mm	quarto 2	397	815	323,555	
Isotelha PUR / CLT 200mm	quarto 3	337	815	274,655	
Isotelha PUR / CLT 200mm	sala	1747	3200	5590,4	6388,61
CLT+teto verde / CLT 200mm	quarto 1	97	1600	155,2	
CLT+teto verde / CLT 200mm	quarto 2	294	815	239,61	
CLT+teto verde / CLT 200mm	quarto 3	207	815	168,705	
CLT+teto verde / CLT 200mm	sala	1362	3200	4358,4	4921,915
CLT+manta / Dry wall 120mm	quarto 1	319	1600	510,4	
CLT+manta / Dry wall 120mm	quarto 2	598	815	487,37	
CLT+manta / Dry wall 120mm	quarto 3	649	815	528,935	
CLT+manta / Dry wall 120mm	sala	1258	3200	4025,6	5552,305
Isotelha EPS / Dry wall 120mm	quarto 1	765	1600	1224	
Isotelha EPS / Dry wall 120mm	quarto 2	1164	815	948,66	
Isotelha EPS / Dry wall 120mm	quarto 3	1260	815	1026,9	
Isotelha EPS / Dry wall 120mm	sala	2013	3200	6441,6	9641,16
Laje Painei / Dry wall 120mm	quarto 1	323	1600	516,8	
Laje Painei / Dry wall 120mm	quarto 2	597	815	486,555	
Laje Painei / Dry wall 120mm	quarto 3	1120	815	912,8	
Laje Painei / Dry wall 120mm	sala	1329	3200	4252,8	6168,955
Isotelha PUR / Dry wall 120mm	quarto 1	758	1600	1212,8	

Isotelha PUR / Dry wall 120mm	quarto 2	1165	815	949,475	
Isotelha PUR / Dry wall 120mm	quarto 3	1255	815	1022,825	
Isotelha PUR / Dry wall 120mm	sala	2058	3200	6585,6	9770,7
CLT+teto verde / Dry wall 120mm	quarto 1	454	1600	726,4	
CLT+teto verde / Dry wall 120mm	quarto 2	769	815	626,735	
CLT+teto verde / Dry wall 120mm	quarto 3	828	815	674,82	
CLT+teto verde / Dry wall 120mm	sala	1590	3200	5088	7115,955
CLT+manta / LDR 200mm	quarto 1	170	1600	272	
CLT+manta / LDR 200mm	quarto 2	517	815	421,355	
CLT+manta / LDR 200mm	quarto 3	552	815	449,88	
CLT+manta / LDR 200mm	sala	1443	3200	4617,6	5760,835
Isotelha EPS / LDR 200mm	quarto 1	541	1600	865,6	
Isotelha EPS / LDR 200mm	quarto 2	1029	815	838,635	
Isotelha EPS / LDR 200mm	quarto 3	1224	815	997,56	
Isotelha EPS / LDR 200mm	sala	2232	3200	7142,4	9844,195
Laje Painel / LDR 200mm	quarto 1	149	1600	238,4	
Laje Painel / LDR 200mm	quarto 2	480	815	391,2	
Laje Painel / LDR 200mm	quarto 3	503	815	409,945	
Laje Painel / LDR 200mm	sala	1455	3200	4656	5695,545
Isotelha PUR / LDR 200mm	quarto 1	523	1600	836,8	
Isotelha PUR / LDR 200mm	quarto 2	1031	815	840,265	
Isotelha PUR / LDR 200mm	quarto 3	1238	815	1008,97	
Isotelha PUR / LDR 200mm	sala	2285	3200	7312	9998,035
CLT+teto verde / LDR 200mm	quarto 1	317	1600	507,2	
CLT+teto verde / LDR 200mm	quarto 2	693	815	564,795	
CLT+teto verde / LDR 200mm	quarto 3	834	815	679,71	
CLT+teto verde / LDR 200mm	sala	1832	3200	5862,4	7614,105
CLT+manta / Isofachada PUR	quarto 1	212	1600	339,2	
CLT+manta / Isofachada PUR	quarto 2	576	815	469,44	
CLT+manta / Isofachada PUR	quarto 3	641	815	522,415	
CLT+manta / Isofachada PUR	sala	1477	3200	4726,4	6057,455
Isotelha EPS / Isofachada PUR	quarto 1	631	1600	1009,6	
Isotelha EPS / Isofachada PUR	quarto 2	1130	815	920,95	
Isotelha EPS / Isofachada PUR	quarto 3	1334	815	1087,21	
Isotelha EPS / Isofachada PUR	sala	2270	3200	7264	10281,76
Laje Painel / Isofachada PUR	quarto 1	191	1600	305,6	
Laje Painel / Isofachada PUR	quarto 2	529	815	431,135	
Laje Painel / Isofachada PUR	quarto 3	571	815	465,365	
Laje Painel / Isofachada PUR	sala	1487	3200	4758,4	5960,5
Isotelha PUR / Isofachada PUR	quarto 1	616	1600	985,6	
Isotelha PUR / Isofachada PUR	quarto 2	1137	815	926,655	

Isotelha PUR / Isofachada PUR	quarto 3	1341	815	1092,915	
Isotelha PUR / Isofachada PUR	sala	2317	3200	7414,4	10419,57
CLT+teto verde / Isofachada PUR	quarto 1	372	1600	595,2	
CLT+teto verde / Isofachada PUR	quarto 2	757	815	616,955	
CLT+teto verde / Isofachada PUR	quarto 3	935	815	762,025	
CLT+teto verde / Isofachada PUR	sala	1876	3200	6003,2	7977,38
CLT+manta / Monolite 200mm	quarto 1	33	1600	52,8	
CLT+manta / Monolite 200mm	quarto 2	135	815	110,025	
CLT+manta / Monolite 200mm	quarto 3	75	815	61,125	
CLT+manta / Monolite 200mm	sala	935	3200	2992	3215,95
Isotelha EPS / Monolite 200mm	quarto 1	96	1600	153,6	
Isotelha EPS / Monolite 200mm	quarto 2	310	815	252,65	
Isotelha EPS / Monolite 200mm	quarto 3	240	815	195,6	
Isotelha EPS / Monolite 200mm	sala	1684	3200	5388,8	5990,65
Laje Painei / Monolite 200mm	quarto 1	34	1600	54,4	
Laje Painei / Monolite 200mm	quarto 2	142	815	115,73	
Laje Painei / Monolite 200mm	quarto 3	82	815	66,83	
Laje Painei / Monolite 200mm	sala	1002	3200	3206,4	3443,36
Isotelha PUR / Monolite 200mm	quarto 1	96	1600	153,6	
Isotelha PUR / Monolite 200mm	quarto 2	308	815	251,02	
Isotelha PUR / Monolite 200mm	quarto 3	241	815	196,415	
Isotelha PUR / Monolite 200mm	sala	1748	3200	5593,6	6194,635
CLT+teto verde / Monolite 200mm	quarto 1	81	1600	129,6	
CLT+teto verde / Monolite 200mm	quarto 2	233	815	189,895	
CLT+teto verde / Monolite 200mm	quarto 3	180	815	146,7	
CLT+teto verde / Monolite 200mm	sala	1378	3200	4409,6	4875,795
CLT+manta / Thermopore	quarto 1	91	1600	145,6	
CLT+manta / Thermopore	quarto 2	138	815	112,47	
CLT+manta / Thermopore	quarto 3	138	815	112,47	
CLT+manta / Thermopore	sala	679	3200	2172,8	2543,34
Isotelha EPS / Thermopore	quarto 1	203	1600	324,8	
Isotelha EPS / Thermopore	quarto 2	309	815	251,835	
Isotelha EPS / Thermopore	quarto 3	290	815	236,35	
Isotelha EPS / Thermopore	sala	1236	3200	3955,2	4768,185
Laje Painei / Thermopore	quarto 1	83	1600	132,8	
Laje Painei / Thermopore	quarto 2	136	815	110,84	
Laje Painei / Thermopore	quarto 3	137	815	111,655	
Laje Painei / Thermopore	sala	681	3200	2179,2	2534,495
Isotelha PUR / Thermopore	quarto 1	203	1600	324,8	
Isotelha PUR / Thermopore	quarto 2	309	815	251,835	
Isotelha PUR / Thermopore	quarto 3	292	815	237,98	

Isotelha PUR / Thermopore	sala	1254	3200	4012,8	4827,415
CLT+teto verde / Thermopore	quarto 1	141	1600	225,6	
CLT+teto verde / Thermopore	quarto 2	221	815	180,115	
CLT+teto verde / Thermopore	quarto 3	205	815	167,075	
CLT+teto verde / Thermopore	sala	918	3200	2937,6	3510,39
CLT+manta / Pannel Tijolo 140mm	quarto 1	35	1600	56	
CLT+manta / Pannel Tijolo 140mm	quarto 2	106	815	86,39	
CLT+manta / Pannel Tijolo 140mm	quarto 3	52	815	42,38	
CLT+manta / Pannel Tijolo 140mm	sala	692	3200	2214,4	2399,17
Isotelha EPS / Pannel Tijolo 140mm	quarto 1	95	1600	152	
Isotelha EPS / Pannel Tijolo 140mm	quarto 2	213	815	173,595	
Isotelha EPS / Pannel Tijolo 140mm	quarto 3	153	815	124,695	
Isotelha EPS / Pannel Tijolo 140mm	sala	1311	3200	4195,2	4645,49
Laje Pannel / Pannel Tijolo 140mm	quarto 1	34	1600	54,4	
Laje Pannel / Pannel Tijolo 140mm	quarto 2	104	815	84,76	
Laje Pannel / Pannel Tijolo 140mm	quarto 3	54	815	44,01	
Laje Pannel / Pannel Tijolo 140mm	sala	737	3200	2358,4	2541,57
Isotelha PUR / Pannel Tijolo 140mm	quarto 1	96	1600	153,6	
Isotelha PUR / Pannel Tijolo 140mm	quarto 2	211	815	171,965	
Isotelha PUR / Pannel Tijolo 140mm	quarto 3	151	815	123,065	
Isotelha PUR / Pannel Tijolo 140mm	sala	1341	3200	4291,2	4739,83
CLT+teto verde / Pannel Tijolo 140mm	quarto 1	73	1600	116,8	
CLT+teto verde / Pannel Tijolo 140mm	quarto 2	168	815	136,92	
CLT+teto verde / Pannel Tijolo 140mm	quarto 3	106	815	86,39	
CLT+teto verde / Pannel Tijolo 140mm	sala	1021	3200	3267,2	3607,31

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Profa. Dra. Cláudia N. D. Amorim