

Mônica Martins Pinto

**DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS DE
ESCRITÓRIOS COM VIDROS INSULADOS EM CLIMAS
BRASILEIROS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Simon Westphal.

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Pinto, Mônica Martins
DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS
COM VIDROS INSULADOS EM CLIMAS BRASILEIROS / Mônica
Martins Pinto ; orientador, Fernando Simon
Westphal, 2017.
237 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis,
2017.

Inclui referências.

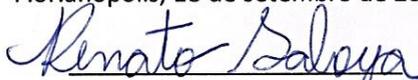
1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Vidro insulado.
3. Desempenho térmico. 4. Simulação energética. I.
Westphal, Fernando Simon. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Mônica Martins Pinto

DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS COM
VIDROS INSULADOS EM CLIMAS BRASILEIROS

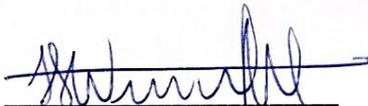
Este (a) Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de "Mestre em Arquitetura e Urbanismo", e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

Florianópolis, 18 de setembro de 2017.



Prof. Renato T. Saboya, Dr.
Coordenador do PósARQ

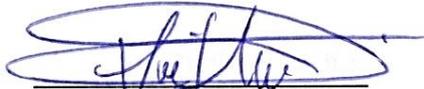
Banca Examinadora:



Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.
Orientador - UFSC



Prof. Martin Ordenes Mizgier, Dr.
UFSC



Prof. Deivis Luis Marinoski, Dr.
UFSC



Prof. Antonio Cesar Silveira Baptista da Silva, Dr.
UFPEL (videoconferência)

Dedico este trabalho à minha mãe, meu pai e minha irmã, meus maiores incentivadores. Aos meus amigos pela parceria. E ao meu orientador, Fernando Westphal, por todo apoio e ensinamentos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ivete Martins Pinto e Marino Antonio Pinto, e à minha irmã, Gabriela Martins Pinto de Aragão, pelo incentivo incondicional, pela parceria e pelo apoio em todos os momentos, não só no período do mestrado, mas em todas as etapas que me trouxeram até aqui e em todas as decisões que tomei até hoje. Agradeço também por me proporcionarem tudo para que eu pudesse me dedicar aos estudos.

Ao professor Fernando Simon Westphal pelo conhecimento transmitido, pelo incentivo à pesquisa, pela paciência, pela parceria e pelo empenho nas orientações.

Aos professores Antonio Cesar Baptista da Silva e Martin Ordenes Mizgier pelas contribuições na fase de qualificação desta pesquisa e também por aceitarem prontamente o convite para participar da avaliação do trabalho final.

Ao professor Deivis Luis Marinoski por se dispor a avaliar o trabalho em sua forma final.

Aos amigos, colegas e professores do LabCEE e do LINSE – UFPEL, onde eu me apaixonei pela área de conforto e eficiência energética em edificações e onde fui muito feliz em conviver com pessoas tão legais e comprometidas com o que fazem.

Aos meus amigos de LabCon – UFSC, por todas risadas; conversas super cabeça ou completamente idiotas; ajudas com dúvidas mil; comidinhas sempre presentes; sábados, domingos e noites de companhia nos estudos; momentos especiais e mais risadas. A parceria e amizade de vocês fez com que toda pressão e ansiedade em se desenvolver uma dissertação se tornassem mais leves.

Aos amigos que Florianópolis e o mestrado me proporcionaram. Acreditem, vocês fizeram com que esse período fosse ainda mais especial.

Aos amigos e familiares que sempre torceram por mim, me incentivaram e compreenderam minhas ausências.

À CAPES pelo apoio financeiro que permitiu que se desenvolvesse este trabalho.

RESUMO

Edifícios comerciais apresentam elevada demanda de ar condicionado devido à alta carga térmica interna e ao horário de funcionamento. A escolha adequada dos materiais da envoltória é essencial para reduzir seu consumo energético, principalmente dos vidros, pois é através destes que ocorrem as trocas mais diretas e intensas, devendo ser adequado ao clima local e à função da edificação. O sistema de vidro insulado é amplamente utilizado na Europa e América do Norte e é difundido como uma ferramenta de melhoria no desempenho e conforto térmico em edificações, porém vem sendo introduzido no mercado brasileiro sem considerar o clima. Com base neste cenário, a presente pesquisa objetiva investigar o desempenho energético de edificações de escritórios condicionados artificialmente que utilizam vidros insulados, para os diferentes climas brasileiros. Para tanto, analisa-se o consumo energético com condicionamento de ar e o balanço térmico de um pavimento hipotético de escritórios em planta aberta, comparando o uso de vidros insulados com um sistema não insulado. Os dados de consumo e fluxo de calor foram obtidos por meio de simulação computacional de edificações, utilizando o *software EnergyPlus*. Além do tipo de vidro, variou-se o percentual de abertura da fachada, o fator solar do vidro e a densidade de ocupação. Avaliaram-se nove cidades: Porto Alegre, Florianópolis, Curitiba, Campo Grande, Cuiabá, Salvador, Recife, São Luís e Boa Vista. Observa-se uma divisão clara na relação de desempenho energético, onde, na região sul do Brasil, os modelos com vidro insulado apresentaram demanda para resfriamento significativamente superior (entre 2% e 11% maior). Nas demais áreas, os modelos com vidro insulado demonstram economia, porém com diferenças pequenas, entre 0% e 4,4%. A análise de balanço térmico demonstrou que, na região sul do país, a perda de calor através dos vidros não insulados atua diminuindo a carga térmica para resfriamento. Os resultados demonstram que, apesar de serem amplamente utilizados em climas rigorosos, a partir da amostra observada, o uso de vidros insulados em edificações de escritórios não é adequado para os climas brasileiros.

Palavras-chave: Vidro insulado, Desempenho térmico, Simulação energética.

ABSTRACT

Commercial buildings have high air conditioning demand due to the high internal heat load and operation time. Proper selection of the envelope materials is essential to reduce their energy consumption. Among these materials, glasses are responsible for the most direct and intense exchanges, and must be adequate to the local climate and the function of the building, since this choice has a direct impact on energy consumption. Insulating glass units are widely used in Europe and North America as a tool for improving thermal performance and comfort in buildings. However, it has been introduced in Brazilian market without regard to the local climate. Based on this scenario, this research aims to investigate the energy performance of office buildings conditioned artificially using insulating glass in different Brazilian climates. Therefore, energy consumption in air conditioning and heat balance of a hypothetical floor office in open plan was analyzed, comparing the use of insulated glass with a non-insulating glass unit. Consumption data and heat flow were obtained by computer simulation of buildings using EnergyPlus software. In addition to the type of glass, three other parameters were determined: window-to-wall ratio, solar heat gain coefficient and occupancy density of the office. Nine cities were evaluated: Porto Alegre, Florianópolis, Curitiba, Campo Grande, Cuiabá, Salvador, Recife, São Luís and Boa Vista. It is observed a clear division in relation to thermoenergy performance, which, in southern Brazil, models with insulating glass unit showed significantly higher demand for cooling (with gaps between 2% and 11%). In the other regions, models with insulated glass show more savings, but with small differences, between 0% and 4.4%. Thermal balance analysis showed that, in the southern region of the country, the loss of heat through non-insulating glass unit acts to reduce the thermal load for cooling, especially during winter. Although the insulating glass unit is widely used in rigorous climates due to the thermal insulation provided, from the observed sample, it is conclude that their use in office buildings is not suitable for Brazilian climates.

Keywords: Insulating glass unit, thermal performance, energy simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transmitância térmica de diferentes sistemas de vidros.....	37
Figura 2 - Propriedades Térmica do Vidro	39
Figura 3 - Detalhe da composição do vidro laminado.	41
Figura 4 - Detalhe da composição do vidro duplo.	42
Figura 5 - Diagrama de volume de controle de balanço térmico externo.....	44
Figura 6 - Diagrama de volume de controle de equilíbrio de calor interno.....	45
Figura 7 - Variáveis utilizadas nas equações de balanço térmico de sistemas de vidros insulados com duas lâminas.....	46
Figura 8 - Variáveis utilizadas nas equações de balanço térmico para sistemas de janelas com duas lâminas de vidro e um dispositivo de sombreamento interno.....	49
Figura 9 - Vista do modelo de referência de Poirazis, Blomsterberg e Wall (2008). Percentual de abertura da fachada: 30%.....	54
Figura 10 - Vista em perspectiva e zoneamento térmico do modelo de simulação.....	55
Figura 11 - Edifício existente utilizado como caso base em estudo de Carvalho, La Rovere e Gonçalves (2010).	56
Figura 12 - Localização do Brasil, América do Norte e Europa em relação aos trópicos	59
Figura 13 - Comparação entre temperaturas médias mensais de diferentes cidades do Brasil, América do Norte e Europa.....	60
Figura 14 - Modelo hipotético de sala de escritório utilizado por Ochoa et al. (2012).....	62
Figura 15 - Consumo energético anual do sistema de condicionamento de ar relativo à variação do tipo de vidro e WWR em (a) Curitiba, (b) São Paulo e (c) Recife.....	64
Figura 16 - Consumo anual energético previsto para condicionamento em função da abertura solar.....	67
Figura 17 - Divisões do pavimento tipo do modelo de edifício estudado por Huang, Niu e Chung (2014).....	68
Figura 18 - Zoneamento térmico do pavimento tipo do modelo utilizado por Besen e Westphal (2012). Dimensões: 40 x 60 metros.	70

Figura 19 - Modelo de pavimento de escritórios utilizado por Besen e Westphal (2014).....	72
Figura 20 - Configurações de vidros analisadas por Andreis, Besen e Westphal (2014).....	73
Figura 21 - Variação do WWR e tipo de vidro X Variação do consumo.....	74
Figura 22 - Planta baixa e perspectiva do modelo de edificação utilizado nas simulações.....	76
Figura 23 - Fontes de fluxo de calor da edificação ao longo dos dias de pico de temperatura interna (verão). Taxa de renovação de ar: 10 R/h.....	76
Figura 24 - Trocas térmicas na edificação no horário de pico (valores correspondentes às taxas de renovação de ar iguais a 1R/h e 20 R/h).....	77
Figura 25 - Balanço térmico para Denver, no dia 4 de junho.	78
Figura 26 - Influência da transmitância térmica. Caso 600, Florianópolis. Carga térmica: 3.940 kWh.....	78
Figura 27 - Vista externa da Casa Eficiente (fachada Norte).	79
Figura 28 - Balanços térmicos do ambiente no intervalo de 7h-13h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), sob diferentes padrões de ventilação diurna, nos meses de dezembro a março.....	80
Figura 29 – (a) Perspectiva e (b) planta baixa do edifício de escritório representativo.....	81
Figura 30 - Balanço térmico do edifício para o caso protótipo em (a) Florianópolis e (b) Fortaleza.....	82
Figura 31 - Planta baixa, divisão das zonas térmicas e perspectivas do caso base.....	83
Figura 32 - Balanço térmico da semana típica de verão para Santa Maria.	84
Figura 33- Balanço Térmico para um dia da semana típica de verão para Santa Maria.....	84
Figura 34 – Radiação Solar Global Horizontal Média Anual: Brasil.....	91
Figura 35- Radiação Solar Global Média Sazonal: Brasil.....	92
Figura 36 – Planta esquemática do pavimento tipo, indicando o condicionamento de ar, dimensões e divisão das	

zonas térmicas (unidade: m). Linhas tracejadas representam partições virtuais.....	96
Figura 37 - Corte esquemático do pavimento tipo.....	97
Figura 38 - Schedules para os dias de semana: (a) Ocupação; (b) Iluminação; (c) Equipamentos.	100
Figura 39 - Demonstração do revestimento de vidro nas paredes externas.....	102
Figura 40 - Funcionamento do sistema de condicionamento de ar. Sendo, 0: desligado e 1: ligado.	104
Figura 41 - Vistas esquemáticas das fachadas com variação do WWR. Unidades: metros.....	107
Figura 42 – Esquema de combinações paramétricas. ...	108
Figura 43 - Organograma das Simulações Computacionais	110
Figura 44 – Histograma de frequência de ocorrência de intervalos de temperaturas médias anuais: capitais brasileiras.	123
Figura 45 - Histograma de frequência de ocorrência de intervalo desvio padrão de temperaturas médias diárias: capitais brasileiras.....	123
Figura 46 – Comparação do percentual de ocorrência da radiação global horizontal média anual: capitais e cidades selecionadas.	125
Figura 47 – Comparação do percentual de ocorrência da temperatura média anual: capitais e cidades selecionadas.	125
Figura 48 – Comparação do percentual de ocorrência do desvio padrão de temperaturas médias diárias: capitais e cidades selecionadas.	125
Figura 49 –Localização das cidades estudadas no mapa do Brasil.	126
Figura 50 - Diferença percentual de consumo para resfriamento entre modelos com vidro insulado e modelos com vidro laminado: alta densidade de ocupação.	129
Figura 51 - Diferença percentual de consumo para resfriamento entre modelos com vidro insulado e modelos com vidro laminado: média densidade de ocupação.....	130
Figura 52 - Mapa demonstrativo dos resultados de diferença de consumo energético com condicionamento de ar: insulado x laminado.....	134

Figura 53 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão : Modelo Laminado X Insulado. Curitiba , FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.	136
Figura 54 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno : Modelo Laminado X Insulado. Curitiba , FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.	136
Figura 55 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno : Modelo Laminado X Insulado. Porto Alegre , FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.	137
Figura 56 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão : Modelo Laminado X Insulado. Porto Alegre , FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.	137
Figura 57 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão : Modelo Laminado X Insulado. Campo Grande , FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.	138
Figura 58 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno : Modelo Laminado X Insulado. Campo Grande , FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.	139
Figura 59 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão : Modelo Laminado X Insulado. Salvador , FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.	139
Figura 60 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno : Modelo Laminado X Insulado. Salvador , FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.	139
Figura 61 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão : Modelo Laminado X Insulado. São Luís , FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.	141
Figura 62 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno : Modelo Laminado X Insulado. São Luís , FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.	141
Figura 63 - Consumo elétrico anual para resfriamento: Porto Alegre. Alta densidade de ocupação.	143
Figura 64 - Consumo elétrico anual para resfriamento: Porto Alegre. Média densidade de ocupação.	143
Figura 65 - Consumo elétrico anual para resfriamento: Florianópolis. Alta densidade de ocupação.	143
Figura 66 - Consumo elétrico anual para resfriamento: Florianópolis. Média densidade de ocupação.	144
Figura 67 - Consumo elétrico anual para resfriamento: Curitiba. Alta densidade de ocupação.	144

Figura 68 - Consumo elétrico anual para resfriamento: Curitiba. Média densidade de ocupação.....	144
Figura 69 - Consumo elétrico anual para resfriamento: Cuiabá. Alta densidade de ocupação.....	145
Figura 70 - Consumo elétrico anual para resfriamento: Cuiabá. Média densidade de ocupação.	145
Figura 71 - Consumo elétrico anual para resfriamento: Recife. Alta densidade de ocupação.....	146
Figura 72 - Consumo elétrico anual para resfriamento: Recife. Média densidade de ocupação.	146
Figura 73 - Consumo elétrica anual para resfriamento: São Luís. Alta densidade de ocupação.	146
Figura 74 - Consumo elétrica anual para resfriamento: São Luís. Média densidade de ocupação.....	147
Figura 75 - Consumo elétrico anual para resfriamento: Boa Vista. Alta densidade de ocupação.....	147
Figura 76 - Consumo elétrico anual para resfriamento: Boa Vista. Média densidade de ocupação.....	147
Figura 77 - Consumo elétrico anual para resfriamento: Campo Grande. Alta densidade de ocupação.	148
Figura 78 - Consumo elétrico anual para resfriamento: Campo Grande. Média densidade de ocupação.....	148
Figura 79 - Consumo elétrico anual para resfriamento: Salvador. Alta densidade de ocupação.	149
Figura 80 - Consumo elétrico anual para resfriamento: Salvador. Média densidade de ocupação.	149
Figura 81 – Temperatura do ar externo: médias mensais.	150
Figura 82 - Temperaturas médias diárias. Destaque para: Porto Alegre, Florianópolis e Curitiba.....	152
Figura 83 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Porto Alegre. Alta densidade de ocupação.	154
Figura 84 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Boa Vista. Alta densidade de ocupação.	155
Figura 85 - Relação entre consumo para resfriamento nas zonas térmicas e a radiação solar incidente: (a) Porto Alegre; (b) Florianópolis.	156

Figura 86 - Relação entre consumo para resfriamento nas zonas térmicas e a radiação solar incidente: (c) São Luís e (d) Boa Vista.....	157
Figura 87 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Curitiba. Alta densidade de ocupação.	157
Figura 88 - Gráfico de Diferença Percentual de Consumo para Resfriamento Comparando Média e Alta Densidade de Ocupação (Consumo Insulado – Consumo Laminado): Porto Alegre	159
Figura 89 - Gráfico de Diferença Percentual de Consumo para Resfriamento Comparando Média e Alta Densidade de Ocupação (Consumo Insulado – Consumo Laminado): Curitiba	159
Figura 90 - Diferença de consumo com resfriamento: Laminado x Insulado. Cuiabá , FS 30% e WWR 60%. (a) Verão e Alta densidade de ocupação; (b) Inverno e Alta densidade de ocupação; (c) Verão e Média densidade de ocupação; (d) Inverno e Média densidade de ocupação.....	161
Figura 91 - Diferença de consumo com resfriamento: Laminado x Insulado. Recife , FS 30% e WWR 60%. (a) Verão e Alta densidade de ocupação; (b) Inverno e Alta densidade de ocupação; (c) Verão e Média densidade de ocupação; (d) Inverno e Média densidade de ocupação.....	162
Figura 92 - Contribuição das fontes de calor no balanço térmico de uma semana representativa de verão (11 a 17/02) e uma de inverno (12 a 18/08), para Boa Vista , por orientação solar. Vidro insulado x Vidro laminado.....	165
Figura 93 - Contribuição das fontes de calor no balanço térmico de uma semana representativa de verão (11 a 17/02) e uma de inverno (12 a 18/08), para Curitiba , por orientação solar. Vidro insulado x Vidro laminado.	166
Figura 94 - Variação da temperatura do ar externo durante as semanas representativas de verão e inverno: Boa Vista e Curitiba.	167
Figura 95 - Balanço térmico do dia representativo de inverno: Vidro insulado ; Leste ; Boa Vista . Alta densidade de ocupação.	169

Figura 96 - Balanço térmico do dia representativo de inverno: Vidro laminado ; Leste ; Boa Vista . Alta densidade de ocupação.....	169
Figura 97 - Balanço térmico do dia representativo de verão: Vidro insulado ; Leste ; Boa Vista . Alta densidade de ocupação.....	170
Figura 98 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro laminado ; Leste ; Boa Vista . Alta densidade de ocupação.....	170
Figura 99 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro insulado ; Norte ; Curitiba . Alta densidade de ocupação.....	172
Figura 100 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro laminado ; Norte ; Curitiba . Alta densidade de ocupação.....	172
Figura 101 - Balanço térmico do dia representativo de inverno. Vidro insulado ; Oeste ; Curitiba . Alta densidade de ocupação.....	173
Figura 102 - Balanço térmico do dia representativo de inverno. Vidro laminado ; Oeste ; Curitiba . Alta densidade de ocupação.....	173
Figura 103 - Balanço térmico do dia representativo de inverno. Vidro insulado ; Sul ; Curitiba . Alta densidade de ocupação.....	174
Figura 104 - Balanço térmico do dia representativo de inverno. Vidro laminado ; Sul ; Curitiba . Alta densidade de ocupação.....	175
Figura 105 - Relação entre consumo para resfriamento nas zonas térmicas e a radiação solar incidente por fachada: Curitiba	175
Figura 106 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro insulado ; Norte ; Boa Vista . Alta densidade de ocupação.....	177
Figura 107 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro laminado ; Norte ; Boa Vista . Alta densidade de ocupação.....	177
Figura 108 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro insulado ; Norte ; Boa Vista . Média densidade de ocupação.....	178

Figura 109 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro laminado ; Norte ; Boa Vista . Média densidade de ocupação.	178
Figura 110 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro insulado ; Leste ; Curitiba . Alta densidade de ocupação.	179
Figura 111 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro laminado ; Leste ; Curitiba . Alta densidade de ocupação 179	179
Figura 112 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro insulado ; Leste ; Curitiba . Média densidade de ocupação.	180
Figura 113 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro laminado ; Leste ; Curitiba . Média densidade de ocupação.	180

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Referências: desempenho de janelas em edifícios.....	32
Tabela 2 - Propriedades Térmicas dos Vidros.....	36
Tabela 3 - Amplitude das temperaturas médias mensais de Boa Vista, Florianópolis, Atenas, Nova Iorque e Londres.....	61
Tabela 4 - Variações dos parâmetros estudados por Lee et al. (2013).....	66
Tabela 5 - Dados técnicos dos vidros simulados.	69
Tabela 6 - Cargas internas do modelo de Besen e Westphal (2012).....	70
Tabela 7 - Resumo de estudos de referência que utilizaram análise de Balanço Térmico com base em dados de simulação computacional com o <i>EnergyPlus</i>	85
Tabela 8 - Intervalos de Classes	95
Tabela 9 - Densidade típica de carga de equipamentos para diversos tipos de escritórios.....	98
Tabela 10 – Tabela resumo: densidade de ocupação....	100
Tabela 11 - Valores limites máximos para paredes externas, estabelecidos pelo RTQ-C.....	101
Tabela 12 - Elementos Construtivos.....	101
Tabela 13 – Propriedades térmicas dos materiais utilizados: densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c).....	102
Tabela 14 - Características do Sistema de Condicionamento de Ar.....	104
Tabela 15 - Propriedades Ópticas e Térmicas dos Vidros	106
Tabela 16 - Relação entre elemento representado no balanço térmico e o dado de saída requisitado na simulação computacional	113
Tabela 17 - Semana e dia representativos selecionados: verão e inverno.....	114
Tabela 18 - Agrupamento das cidades por latitude e existência de arquivo climático.	116
Tabela 19 - Escala de Radiação Solar.....	117
Tabela 20 - Radiações Médias Anuais e Sazonais da Capitais Brasileiras.....	118
Tabela 21 - Escala de Temperaturas Médias Anuais.....	120

Tabela 22 - Escala de Desvio Padrão de Temperaturas Médias Diárias	121
Tabela 23 - Temperaturas Médias Anuais das Capitais Brasileiras	122
Tabela 24 - Cidades selecionadas e critérios de escolha	124
Tabela 25 - Arquivos Climáticos	127
Tabela 26 - Tipo de vidro indicado para cada cenário: alta densidade de ocupação.	133
Tabela 27 - Tipo de vidro indicado para cada cenário: média densidade de ocupação.	133
Tabela 28 - Temperatura do ar no verão e no inverno: Cuiabá, Recife, São Luís e Boa Vista.....	140

LISTA DE ABREVIATURAS , SIGLAS E SÍMBOLOS

α	Absortância [%]
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BEN	Balanço Energético Nacional
BTO	<i>Building Technologies Office</i> (Escritório de Tecnologias em Edificações)
COMFEN	<i>Commercial Fenestration/Façade Design Tool</i>
COP	<i>Coefficient of Performance</i> (Coeficiente de Performance do Sistema de Condicionamento)
CT	Capacidade Térmica [kJ/m ² K]
DOE	<i>U.S. Department of Energy (Departamento de Energia dos Estados Unidos)</i>
EVA	Etileno-vinil-acetato
FS	Fator solar [%]
ILD <i>Density</i>)	Densidade de Carga Interna (<i>Internal Load</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO Tecnologia	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IV	Radiação Infravermelha
LBNL	<i>Lawrence Berkeley National Laboratory</i>
LV	Luz Visível
NBR	Norma Brasileira
PIB	Produto Interno Bruto
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i> (Voto Médio Predito)
p.p.	Ponto Percentual

PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i> (Percentual Predito de Insatisfeitos)
PTHP	<i>Packaged Terminal Heat Pump</i>
PU	Padrão de Uso
PVB	Polivinil Bunital
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
SHGC	Solar Heat Gain Coefficient (Coeficiente de Ganho de Calor Solar) [%]
SWERA	<i>Solar and Wind Energy Resource Assessment</i>
TIR	Taxa Interna de Retorno
TL	Transmissão Luminosa [%]
TMY	<i>Typical Meteorological Year</i>
TRY	<i>Test Reference Year</i>
U	Transmitância térmica [W/m ² .K]
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UV	Radiação Ultravioleta
WWR	Window-to-Wall Ratio (Percentual de Abertura da Fachada) [%]
ZB	Zoneamento Bioclimático Brasileiro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	<i>PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA.....</i>	29
1.2	<i>OBJETIVOS</i>	33
1.2.1	Objetivo Geral	33
1.2.2	Objetivos Específicos.....	33
1.3	<i>ESTRUTURA DO TRABALHO.....</i>	33
2	REFERENCIAL TEÓRICO	35
2.1	<i>VIDROS.....</i>	35
2.1.1	Propriedades térmicas dos vidros.....	35
2.1.2	Fluxo de calor através dos vidros	38
2.1.3	Tipos de vidros	40
2.2	<i>SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES: ENERGYPLUS.....</i>	42
2.2.1	Processos de Balanço Térmico no <i>EnergyPlus</i>	43
2.2.2	Processos de Balanço Térmico no <i>EnergyPlus</i> : Janelas	46
3	REVISÃO DE LITERATURA	51
3.1	<i>DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS.....</i>	51
3.1.1	Ocupação e cargas internas	52
3.1.2	Orientação solar	53
3.1.3	Envoltória	55
3.2	<i>O VIDRO NAS FACHADAS</i>	57
3.2.1	O uso de vidros insulados.....	58
3.3	<i>INFLUÊNCIA DO VIDRO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIO</i>	61
3.4	<i>ANÁLISES DE BALANÇO TERMOENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES</i>	75
3.5	<i>CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO DE LITERATURA.....</i>	87
4	MÉTODO.....	89

4.1	<i>SELEÇÃO DOS CLIMAS</i>	89
4.1.1	Radiação Solar Global Horizontal	90
4.1.2	Temperatura Externa do Ar	92
4.1.3	Seleção Final.....	95
4.2	<i>MODELAGEM DO EDIFÍCIO</i>	95
4.2.1	Geometria.....	96
4.2.2	Ganhos internos	97
4.2.3	Materiais Construtivos.....	100
4.2.4	Sistema de Condicionamento de Ar.....	103
4.3	<i>ESPECIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS VARIÁVEIS</i> 104	
4.4	<i>SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE</i> <i>DESEMPENHO ENERGÉTICO</i>	108
4.5	<i>ANÁLISE DE DESEMPENHO ENERGÉTICO</i>	110
4.5.1	Consumo de energia elétrica: vidro insulado x vidro laminado.....	111
4.5.2	Relação entre consumo energético e temperatura do ar externo	111
4.5.3	Relações entre os parâmetros variáveis e o consumo energético.....	112
4.5.4	Consumo energético por zona térmica	112
4.5.5	Variação na densidade de ocupação	112
4.6	<i>ANÁLISE DE BALANÇO TÉRMICO</i>	112
5	RESULTADOS E ANÁLISES	115
5.1	<i>SELEÇÃO DOS CLIMAS E ARQUIVOS</i> <i>CLIMÁTICOS</i>	115
5.1.1	Radiação Solar Global Horizontal	116
5.1.2	Temperatura Externa do Ar	119
5.1.3	Seleção Final.....	123
5.1.4	Arquivos Climáticos.....	126
5.2	<i>DESEMPENHO ENERGÉTICO</i>	128
5.2.1	Consumo de energia elétrica: vidro insulado x vidro laminado	128
5.2.2	Relação entre consumo energético e temperatura do ar externo	135
5.2.3	Relações entre os parâmetros variáveis e o consumo energético.....	142
5.2.4	Consumo energético por zona térmica	152

5.2.5	Variação na densidade de ocupação.....	158
5.3	<i>BALANÇO TÉRMICO</i>	163
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	181
6.1	<i>CONCLUSÕES</i>	181
6.1.1	Desempenho termo energético.....	181
6.1.2	Balanço Térmico	184
6.1.3	Conclusões Gerais.....	185
6.2	<i>CONSIDERAÇÕES FINAIS</i>	186
6.2.1	Limitações da Pesquisa	186
6.2.2	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	187
	REFERÊNCIAS	189
	APÊNDICE A - Gráficos Comparativos entre Consumos Diários com Resfriamento do Ar: Modelo com Vidro Insulado X Modelo com Vidro Laminado.	197
	APÊNDICE B - Gráficos de Diferença Percentual de Consumo Energético para Resfriamento do Ar Global e por Orientação Solar: (Insulado – Laminado)	209
	APÊNDICE C - Relação entre Consumo Energético para Resfriamento por Zonas Térmicas Periférica e a Radiação Solar Média Anual Incidente por Fachada	219

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

O tema eficiência energética vem ganhando destaque no Brasil, principalmente após a crise energética de 2001. Desde então, as discussões sobre a necessidade de redução do consumo de energia elétrica são frequentes no âmbito nacional. Atualmente, o Brasil apresenta um quadro de alto consumo de energia elétrica, o qual permanece em crescimento e com custos cada vez mais elevados. No período entre 2011 e 2015, o PIB (produto interno bruto) brasileiro anual obteve um crescimento final de 1%, enquanto o consumo anual com energia elétrica apresentou um aumento de 8,7% (MME, 2016). Segundo o Balanço Energético Nacional 2016 (BEN) (MME, 2016), no Brasil, os edifícios foram responsáveis por 43% do consumo total da energia elétrica gerada no país em 2015, sendo 14,8% referentes ao setor comercial (espaços ligados a comércio e prestação de serviços).

Quando se analisa o uso final da energia elétrica em edifícios comerciais, o condicionamento de ar representa entre 35 e 70% do consumo total da edificação (LI; LAM, 2000; CARVALHO; ROVERE; GONÇALVES, 2010; BESEN; WESTPHAL, 2014). Esta variação depende, principalmente, do clima local, sendo maior a porcentagem de participação em climas tropicais e menor em climas temperados. Este alto consumo com condicionamento também está relacionado à alta carga térmica interna presente neste tipo de ambiente.

Huang e Niu (2015) enfatizam que o balanço correto entre os custos em energia e o fornecimento e manutenção do conforto de uma edificação requer um exercício em conjunto entre projetistas, proprietários e usuários. Estratégias na arquitetura e escolha de materiais devem ser pensadas para maximizar o conforto na edificação gerando o menor consumo energético possível.

Uma edificação possui duas principais fontes de ganho de calor: internos (ocupação, iluminação e equipamentos) e externos (as trocas de calor pela envoltória). Os ganhos térmicos externos da edificação advêm, em grande parte, da radiação solar que incide na sua envoltória. Esta deve atuar como um filtro moderador – de luz, calor, ar e umidade – entre o espaço interno e o meio externo,

tornando-a um fator determinante na manutenção da qualidade ambiental interna e na maximização da eficiência energética da edificação, independente das variações nas condições externas.

Quando se fala na transmissão de calor através da envoltória, enfatiza-se a preocupação com vidros, pois nestes as trocas são mais diretas e intensas devido à sua transparência à radiação solar e elevada transmitância térmica. Devido à sua transparência à radiação de ondas curtas, mas opacidade à radiação de ondas longas oriundas das superfícies aquecidas no interior do ambiente, o vidro provoca efeito estufa no ambiente interno, visto que a transmissão de calor por condução é mais lenta do que o ingresso da radiação solar.

Portanto, a escolha do vidro deve ser adequada ao clima local e à função do edifício, visto que tem impacto direto no seu consumo energético. A escolha do vidro no projeto arquitetônico pode ser caracterizada como uma estratégia passiva, quando pensada para amenizar o efeito da radiação solar. Singh e Garg (2009) destacam a relação do clima com a economia de energia, visto que uma mesma janela não funcionará de maneira idêntica em climas distintos. O que é benefício para um, pode se transformar em prejuízo para outro.

Atualmente observa-se que as fachadas completamente envidraçadas vêm sendo reproduzidas como um modelo internacional na arquitetura corporativa, também seguido no Brasil. Diversas justificativas são atribuídas ao uso deste modelo de fachada, principalmente relacionado a vasta visão do exterior e integração interior/exterior. Os avanços tecnológicos na composição dos vidros também incentivam projetistas e proprietários a empregar revestimentos em vidro. (TRAPANO; BASTOS, 2010)

Huang, Niu e Chung (2014) destacam que, ao mesmo tempo em que a visual para o ambiente externo é altamente desejável pelos usuários, a utilização de grandes panos de vidro pode gerar um aumento significativo na carga térmica da edificação, causando desconforto, maiores gastos com condicionamento de ar e conseqüente aumento no consumo energético. Isto ocorre pois, além de permitirem maior ganho de calor no ambiente, também o perdem excessivamente. Quando um vidro simples, sem controle solar, é aplicado a estas grandes áreas de abertura, o consumo energético em condicionamento de ar e desconforto térmico são potencializados.

Além da padronização que ocorre nos modelos arquitetônicos utilizados atualmente, nota-se uma tentativa de também importar as tecnologias construtivas empregadas, sem considerar, entretanto, o clima local. Os vidros insulados são um exemplo desta situação. Este tipo de composição consiste em duas ou mais lâminas de vidro posicionadas paralelamente formando câmaras de ar ou outro gás de baixa condutividade térmica entre elas. O principal objetivo desta composição é o isolamento térmico proporcionado pela camada de gás. Este bloqueio atua tanto no fluxo exterior-interior, dificultando a entrada de calor por diferença de temperatura, como no fluxo interior-exterior, dificultando a dissipação de carga interna gerada por pessoas, iluminação e equipamentos (HUANG; NIU; CHUNG, 2014). Este bloqueio tende a reforçar o efeito estufa provocado pelo vidro.

Devido ao isolamento proporcionado pela câmara de gás, os vidros insulados são amplamente utilizados em países Europeus e da América do Norte, onde há invernos rigorosos, objetivando promover maior eficiência energética e conforto térmico no interior das edificações. Segundo Besen e Westphal (2012), este tipo de vidro é indicado para climas extremos (frios ou quentes) e tem sido utilizado em edificações comerciais no Brasil “sem que anteriormente houvesse grandes estudos para avaliar a eficiência de sua adequação aos climas brasileiros”.

Frequentemente encontram-se pesquisas, principalmente europeias, que já pressupõem que os vidros insulados são uma ferramenta de otimização da eficiência energética de edificações, comerciais e residenciais. Diversos estudos de desempenho de janelas em edifícios consideram apenas composições de vidros insulados, duplos e triplos, entre as variáveis selecionadas. A Tabela 1 apresenta alguns exemplos destas pesquisas, indicando o ano em que foram realizadas, as cidades estudadas e as latitudes onde as mesmas se encontram.

Os gregos Tsagarakis, Karyotakis e Zografakis (2012) apresentam uma breve revisão sobre políticas de conservação de energia em relação a escolha dos vidros, aquecimento central e condicionamento de ar na qual o uso de vidros duplos é prontamente denotado como uma medida de economia de energia que contribui para consumo energético eficiente e para as condições de conforto térmico e acústico no ambiente interno de edifícios de escritórios.

Destaca-se que o emprego de vidros duplos é obrigatório na Grécia desde 1979, ano em que entrou em vigência a Regulamentação de Isolamento Térmico de Edifícios, satisfazendo requisitos da normatização da União Europeia.

Tabela 1 – Referências: desempenho de janelas em edifícios.

Autores	Ano	Localidades	Latitudes
Stegou-Sagia	2007	Atenas e Tessalônica (Grécia)	38°N / 41°N
Poirazis, Blomsterberg e Wall	2008	Gotemburgo (Suécia)	58°N
Jaber e Ajib	2011	Amã e Aqaba (Jordânia); Berlim (Alemanha)	32°N / 29°N / 52°N
Ochoa et al.	2012	Amsterdã (Holanda)	52°N
Lee et al.	2013	Manila (Filipinas); Taipé (Taiwan); Xangai (China); Seul (República da Coreia); Sapporo (Japão)	14°N / 25°N / 31°N / 37°N / 43°N
Atzeri et al.	2016	Roma (Itália)	42°N

Entretanto, no geral, essas localidades encontram-se em altas latitudes, enquanto grande parte do Brasil está localizado em baixas latitudes. Neste contexto, pergunta-se: para os climas encontrados no Brasil, o isolamento térmico gerado pela utilização de vidros insulados também seria uma ferramenta de melhoria no desempenho térmico das edificações de escritórios?

Para tanto, realizou-se um estudo exploratório, de caráter empírico, no qual se analisa o desempenho térmico de um pavimento típico de edifício de escritórios de planta aberta e condicionado artificialmente, utilizando vidros insulados. Este estudo foi executado comparando duas configurações de fachada em pele de vidro: uma opção com vidro laminado e outra com o mesmo vidro na composição insulada. Além do tipo de vidro, estabeleceram-se outros três parâmetros variáveis: o percentual de abertura da fachada, o fator solar base da composição e a densidade de ocupação do escritório. Optou-se por comparar o uso de composições de vidro insulado à utilização do vidro laminado, o mesmo da composição insulada, a fim de extrair o efeito do isolamento térmico (redução da transmitância térmica) decorrente da câmara de ar.

Com o intuito de abranger os diferentes climas encontrados no território brasileiro, optou-se por uma seleção de cidades que considerasse os dados de temperatura do ar externo e incidência de radiação solar contemplando os diversos climas brasileiros. Foram eleitas, então, nove cidades: Porto Alegre, Florianópolis, Curitiba, Campo Grande, Cuiabá, Salvador, Recife, São Luís e Boa Vista. As previsões dos dados de consumo de energia elétrica e fluxo de calor foram obtidas por meio do *software* de simulação computacional *EnergyPlus*. Avaliou-se o desempenho térmico do vidro insulado com base no consumo energético com condicionamento do ar.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como principal objetivo analisar o efeito do uso de vidros insulados no desempenho energético de edificações de escritórios condicionadas artificialmente para os diferentes climas brasileiros.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Definir uma relação de cidades representativas dos climas encontrados no Brasil, para análise de fachadas envidraçadas.
- b) Identificar as características climáticas que justifiquem o uso de vidros insulados em ambientes de escritórios.
- c) Verificar se há variações significativas de consumo de energia em ambientes de escritórios voltados à diferentes orientações solares que justifiquem o uso de vidro insulado.
- d) Averiguar possíveis divergências no comportamento termo energético de edifícios de escritórios com diferentes densidades de ocupação que justifiquem o uso de vidro insulado.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A pesquisa está dividida em seis capítulos principais.

O primeiro traz a introdução ao tema trabalhado. Apresenta a problemática do uso de amplas áreas envidraçadas nas fachadas e

da internacionalização da arquitetura e construção civil no Brasil, com foco na utilização de vidros insulados. Expõe-se seus efeitos, principalmente em relação ao desempenho térmico de edificações de escritórios. Também descreve os objetivos geral e específicos a serem alcançados com a pesquisa.

O segundo capítulo apresenta o referencial teórico com conceitos importantes para o desenvolvimento e entendimento desta pesquisa referentes às propriedades dos vidros. Aborda também o entendimento de alguns processos relacionados ao *software* de simulação computacional de desempenho termo energético de edificações, *EnergyPlus*.

O terceiro capítulo discorre sobre pesquisas que investigaram os fatores que influenciam no desempenho térmico de edifícios de escritórios e a importância da escolha adequada do tipo de vidro.

O quarto capítulo descreve os procedimentos utilizados para alcançar os objetivos desta pesquisa. Definiu-se um método para selecionar as cidades que serão estudadas de forma a contemplar a variedade climática brasileira embasado nos fatores climáticos de maior influência no estudo do uso de vidros. Na sequência, caracterizou-se um modelo de edificação e quais serão os seus parâmetros variáveis. Determinaram-se os dados de simulação computacional e, por fim, foram definidas quais análises foram realizadas, por meio dos dados de saída obtidos por simulação.

O quinto capítulo apresenta os resultados da pesquisa em três partes principais. Primeiramente, discorre-se sobre os resultados e realização dos procedimentos referentes a seleção dos climas representativos. Ao fim deste item, é apresentada a lista de cidades utilizadas neste estudo. Em seguida, são apresentados os resultados e análises com relação ao desempenho termo energético dos modelos simulados. Analisam-se o consumo energético anual para resfriamento, a variação do consumo energético para resfriamento entre as zonas térmicas conforme orientação solar, e a relação entre o consumo energético diário para resfriamento e a temperatura diária do ar externo. Após, apresentam-se os resultados e discussões quanto ao balanço térmico nos modelos simulados.

Por fim, o sexto capítulo apresenta as conclusões obtidas mediante as análises realizadas. Ademais, comentam-se as limitações da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, apresentam-se alguns conceitos teóricos importantes para o desenvolvimento e entendimento desta pesquisa referentes às propriedades dos vidros e ao *software* de simulação computacional de desempenho termo energético de edificações, *EnergyPlus*.

2.1 VIDROS

O vidro é o principal material transparente utilizado em edificações. Para seu uso adequado é necessário compreender os conceitos relacionados às propriedades térmicas do material e como ocorre o fluxo de calor através deste elemento. Além disso, expõe-se os tipos de vidros e composições de vidros encontradas no mercado, com ênfase nos tipos empregados nesta pesquisa.

2.1.1 Propriedades térmicas dos vidros

As propriedades térmicas dos vidros permitem entender e prever o comportamento do material. A NBR 16023 (ABNT, 2011) define nove propriedades térmicas dos vidros, conforme Tabela 2.

Destes, os principais índices que caracterizam o comportamento térmico do vidro para uma decisão inicial de projeto são o fator solar e o coeficiente de transmissão térmica.

Tabela 2 - Propriedades Térmicas dos Vidros

Propriedade	Sigla	Definição
Transmissão ultravioleta	Tuv	Fração do componente UV incidente da radiação solar transmitida através do vidro. [%]
Absorção energética	Abs	Fração da radiação solar incidente absorvida pelo vidro. [%]
Transmissão de energia	TE	Fração de energia solar incidente transmitida diretamente pelo vidro. [%]
Reflexão de energia externa	REe	Fração de radiação solar incidente refletida diretamente para o lado externo. [%]
Reflexão de energia interna	REi	Fração de radiação solar incidente, absorvida pelo vidro e transmitida para o lado interno. [%]
Fator solar	FS	É a soma do calor da atmosfera por transmissão solar direta, mais a transmissão indireta dos corpos aquecidos pelo sol. [%]
Coefficiente de sombra	CS	Relação entre o fator solar do vidro em questão e do vidro-base (<i>float</i> incolor de 3mm). [%]
Coefficiente de transmissão térmica	U	Quantidade de calor que passa por uma unidade de tempo, em regime estacionário, através de uma superfície de vidro, para cada grau de diferença de temperatura entre o interior e o exterior. [W/m ² .K]
Emissividade	ϵ	É a capacidade do vidro de emitir (mais ou menos) energia na forma de radiação infravermelha. [%]

Fonte: ABNT, 2011.

2.1.1.1 Coeficiente de Transmissão Térmica ou Transmitância Térmica (U)

A transmitância térmica em uma janela será a taxa de transferência de calor através do material, como definido pela ASHRAE (2009). Segundo Lee et al. (2013), a transmitância das janelas costuma ser cinco vezes maior que outros componentes opacos do envelope da edificação. Devido a esse fato, cerca de 20 a 40% da energia total do edifício é dissipada através das janelas.

O Manual de Fundamentos da ASHRAE (ASHRAE, 2009) indica o software WINDOW 5 para estimar o valor de transmitância térmica das composições de vidros complexas, como os vidros insulados. O software desenvolvido pelo Lawrence Berkeley National Laboratory (Berkeley Lab), atualmente está na versão 7.4 (LBNL, 2016).

Este valor dependerá de variáveis como a espessura do vidro, o número de lâminas, a espessura da câmara de ar, a inclinação do plano em relação a vertical, a emissividade das superfícies e a composição do gás utilizado. Com base na biblioteca de vidros do *WINDOW*, pode-se exemplificar a influência destes fatores na variação da transmitância de diferentes sistemas de vidros.

Por exemplo, um vidro simples transparente de 3mm possui transmitância de 5,913 W/m².K. Alterando a espessura para 6mm, obtém-se uma transmitância de 5,818 W/m².K. Ao inserir outra lâmina do mesmo vidro, espaçada por uma câmara de ar com 6mm de espessura, este valor diminui para 3,114 W/m².K, quase metade em relação ao caso anterior. Ampliando o espaçamento para 12mm, a transmitância decresce ainda mais, 2,703 W/m².K. Ao substituir o vidro externo por um vidro de 3mm com revestimento *Low-e* (baixa emissividade) voltada ao interior da câmara de ar, a transmitância será 1,690 W/m².K. E, por fim, preenchendo a câmara de gás por argônio, a transmitância diminui para 1,382 W/m².K. A Figura 1 demonstra visualmente os exemplos apresentados.

Figura 1 – Transmitância térmica de diferentes sistemas de vidros.

Descrição	Esquema	U
Vidro transparente (3mm)		U = 5,913 W/m ² .K
Vidro transparente (6mm)		U = 5,818 W/m ² .K
Vidro duplo com ar (6+6+6mm)		U = 3,114 W/m ² .K
Vidro duplo com ar (6+12+6mm)		U = 2,703 W/m ² .K
Vidro duplo Low-e com ar (3+12+6mm)		U = 1,690 W/m ² .K
Vidro duplo Low-e com argônio (3+12+6mm)		U = 1,382 W/m ² .K

Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do software *WINDOW* 7.4 (LBNL, 2016).

2.1.1.2 Fator Solar

O Fator Solar (FS), ou SHGC (*Solar Heat Gain Coefficient* – Coeficiente de Ganho de Calor Solar), define a parcela de energia, advinda da radiação solar incidente no vidro, que alcança o ambiente interno. Este coeficiente considera a porção desta radiação que é transmitida diretamente através do vidro e, também, a porção absorvida pelo vidro que, após, é transmitida ao ambiente interno por condução e convecção. (ASHRAE, 2009)

O Fator Solar é essencial para prever o ganho de calor solar na edificação através dos vidros. A ASHRAE (2009) recomenda que este coeficiente deve ser informado pelos fabricantes de vidros, juntamente com a transmitância térmica e demais propriedades ópticas, tais como transmitância e refletância à radiação solar, transmitância e refletância à radiação visível e emissividade nas duas faces do vidro.

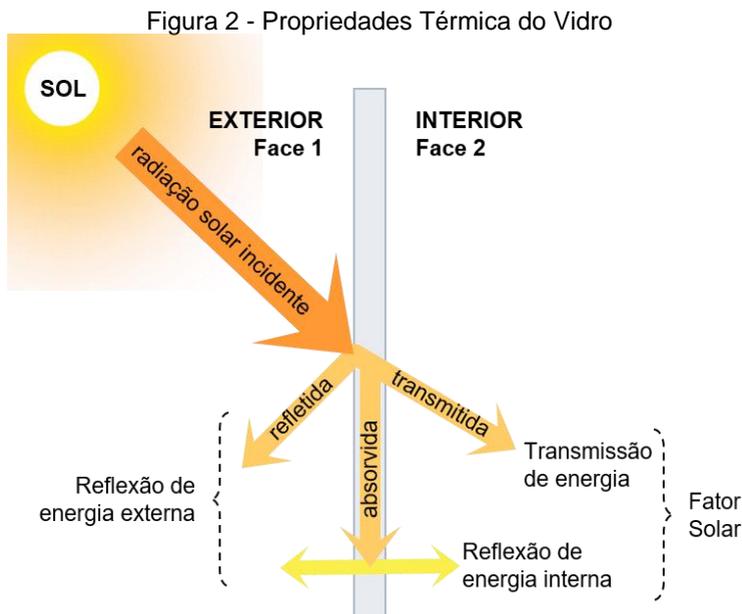
2.1.2 Fluxo de calor através dos vidros

As trocas térmicas através da janela ocorrem basicamente por radiação, diretamente transmitida ao interior da edificação, por condução, ocasionada pela diferença de temperatura no ar entre o interior e exterior, e por convecção, ocasionada pelo contato do vidro com o ar externo e com o ar interno.

As fontes de calor externas serão a diferença de temperatura entre o ar externo e o ar interno e a radiação solar incidente na fachada. Há três principais tipos de energias emitidas pelo sol, de acordo com seu comprimento de onda. O espectro solar é subdividido em infravermelho (IV), luz visível (LV) e ultravioleta (UV). Destas, as ondas infravermelhas são a fração da radiação solar percebida como calor.

A energia solar incidente sobre o vidro terá parte transmitida diretamente ao interior da edificação através do vidro, por meio de radiação de ondas curtas. Uma parcela incidirá sobre o vidro e será refletida ao exterior e o restante será absorvido pelo vidro e transmitido aos ambientes internos ou novamente ao exterior, por meio de condução pelo material e convecção pelo ar (Figura 2). A

parcela de energia dita pela norma como reflexão de energia é o calor irradiado a partir do vidro em direção ao ambiente interno e ao meio externo.



Esse fluxo também poderá ocorrer no sentido oposto, onde a transmissão de calor ocorrerá do interior para o exterior, caso em que o ambiente perderá calor para o meio externo. A direção deste fluxo dependerá principalmente da diferença de temperatura entre o ambiente e o exterior. Quando se pondera sobre o fluxo de calor em uma composição de janela com apenas uma lâmina de vidro, considera-se que não há diferença de temperatura entre as superfícies interna e externa do vidro, desta forma o calor absorvido pelo material é diretamente transferido ao ar por convecção.

O vidro é transparente à parcela da radiação solar de ondas curtas, permitindo que penetre diretamente no ambiente interno. Esta irá aquecer as superfícies presentes no interior. As superfícies aquecidas irão irradiar calor de volta ao ambiente, entretanto este

será na forma de ondas longas (infravermelho). Este calor só poderá ser transferido novamente ao meio externo por condução térmica através dos materiais de envoltória, mesmo através do vidro. Isto ocorre, pois, o vidro é opaco às ondas infravermelhas. Este fenômeno é conhecido como efeito estufa, em que a parcela de calor transmitida diretamente ao ambiente fica “aprisionada” em seu interior. Ao diminuir a transmitância térmica dos vidros, inserindo lâminas de vidro espaçadas por câmaras fechadas de ar, por exemplo, este efeito é amplificado.

2.1.3 Tipos de vidros

A norma ABNT NBR 7199:2016 (ABNT, 2016) cita diversos tipos de vidros utilizados na construção civil, tais como vidro *float* (ou flotado), temperado, laminado, insulado e de controle solar. O vidro *float* é o substrato para os demais tipos de vidros de acordo com o tratamento e o sistema que foram definidos.

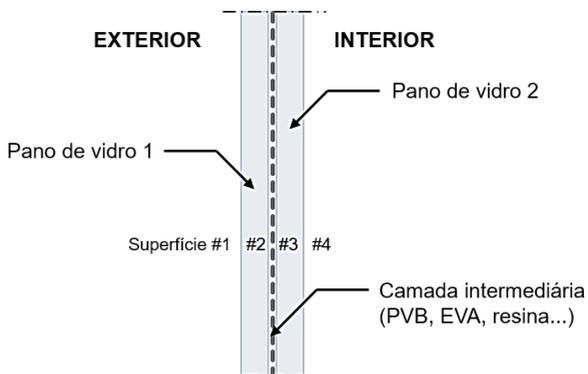
A seguir são apresentados os dois tipos de vidro utilizados como base desta pesquisa: o vidro laminado e o vidro insulado.

2.1.3.1 Vidros Laminados

Segundo ASHRAE (2009), o vidro laminado é uma composição de duas laminas de vidro *float* fixadas com uma camada intermediária composta, normalmente, por um material plástico (transparente ou colorido). Esta lâmina intermediária costuma ser composta por PVB (polivinil butiral), EVA (Etileno-vinil-acetato) ou resina, e tem como principais funções o acréscimo na resistência mecânica da composição, o isolamento acústico, o controle luminoso e/ou o controle solar.

Na superfície entre as camadas de vidro também pode ser aplicado um revestimento de baixa emissividade que confere propriedades de controle da radiação solar à composição. Os revestimentos afetam a transmissão da radiação solar e da luz visível através do vidro.

Figura 3 - Detalhe da composição do vidro laminado.



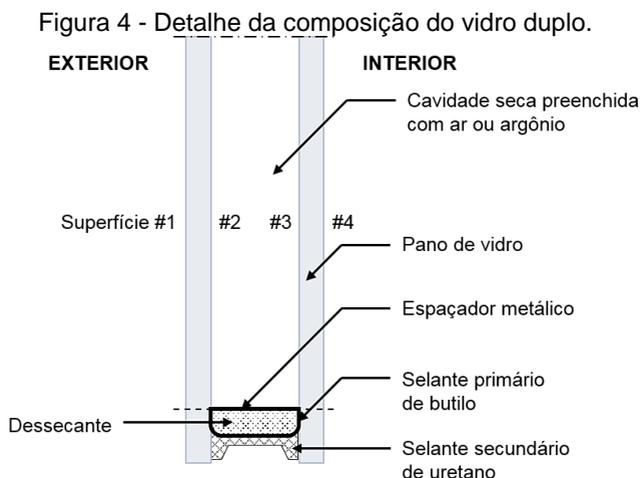
Fonte: elaborado pela autora.

2.1.3.2 Vidros Insulados

Conceitualmente, o vidro insulado é definido pela ASHRAE (2009) como uma configuração de múltiplas unidades de vidros, formado por duas ou mais placas de vidros, com câmara de gás entre elas. As configurações mais usuais encontradas são de vidros duplos e triplos. Segundo a NBR 16015 (ABNT, 2012), estas placas são colocadas paralelamente e seladas hermeticamente ao longo de toda borda. Os selantes primário e secundário e o dessecante são utilizados como forma de manter o gás interno com umidade controlada e sem interferência do ar externo. As câmaras de ar formadas podem ser preenchidas com ar, ou outros gases de baixa condutividade térmica, tais como argônio, xenônio e criptônio, que contribuem para o isolamento térmico da composição. A norma também prevê a possibilidade de acréscimo de perfis decorativos ou com propósito funcional na câmara de gás, como persianas. A Figura 4 apresenta um detalhe construtivo de um vidro insulado duplo.

O efeito principal ao inserir uma segunda camada de vidro, com uma câmara de ar entre os planos, é a elevação da resistência térmica. Aumentando o isolamento térmico, conseqüentemente, a transmitância térmica do conjunto será menor. Esta barreira é proporcionada pela câmara de gás e atua no fluxo de calor tanto no sentido exterior-interior, dificultando a entrada de calor por diferença

de temperatura, como no sentido interior-exterior, impedindo a dissipação de carga interna gerada por pessoas, iluminação e equipamentos. O sentido deste fluxo de calor dependerá de qual ambiente (interior do edifício ou ambiente externo) está com a temperatura do ar mais elevada.



Fonte: Adaptada de ASHRAE, 2009.

2.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES: *ENERGYPLUS*

Os programas de simulação de desempenho termo energético de edificações são ferramentas que possibilitam aos projetistas investigar a influência de suas escolhas, relacionadas a materiais, desenho arquitetônico e sistemas, no desempenho da edificação.

O *software EnergyPlus* é a ferramenta de simulação de desempenho térmico e energético de edificações mais difundida atualmente. Este é um programa computacional gratuito que faz parte de um programa de modelagem energética de edificações financiado pelo *Building Technologies Office* (BTO – Escritório de Tecnologias em Edificações) do *US Department of Energy* (DOE – Departamento de Energia dos Estados Unidos). Este programa segue em constante

atualização, em um ritmo atual de uma nova versão a cada seis meses.

A partir de dados de entrada relacionados ao clima local, geometria do prédio, propriedades dos materiais empregados, especificações técnicas dos sistemas instalados e padrões de ocupação e uso da edificação, o *EnergyPlus* permite estimar o comportamento e desempenho termo energético do edifício modelado. O software gera dados de saída, em arquivos de texto, relacionados a temperatura, radiação incidente, carga térmica e consumo de energia elétrica (global e para aquecimento, resfriamento, ventilação, iluminação e cargas internas), transmissão de calor e uso da água, entre outras possibilidades.

2.2.1 Processos de Balanço Térmico no *EnergyPlus*

O balanço térmico do modelo é realizado pelo software *EnergyPlus* utilizando algoritmos de transferência de calor. Este processo realiza-se considerando as transferências de calor por condução (através dos materiais), por convecção (entre as superfícies e o ar) e por radiação de ondas curtas e ondas longas.

Os fluxos de calor através do edifício podem ser divididos em dois grupos:

a) Balanço Térmico nas Superfícies Externas: ocorre entre as superfícies externas e o meio exterior à edificação.

b) Balanço Térmico Interno: ocorre entre as superfícies e fontes de calor no interior do ambiente e o ar interno.

Segundo o manual de engenharia do programa, o “*Engineering Reference*” (DOE, 2016), o balanço térmico nas superfícies opacas externas é calculado como o equilíbrio entre as cargas solares incidentes na face, as trocas por radiação com o entorno, a convecção entre a superfície externa e o ar circundante e a condução de calor pelo componente (parede, cobertura e piso em contato com o ar externo). Este balanço é expresso pela equação (1) e demonstrado na Figura 5.

$$q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (1)$$

Onde,

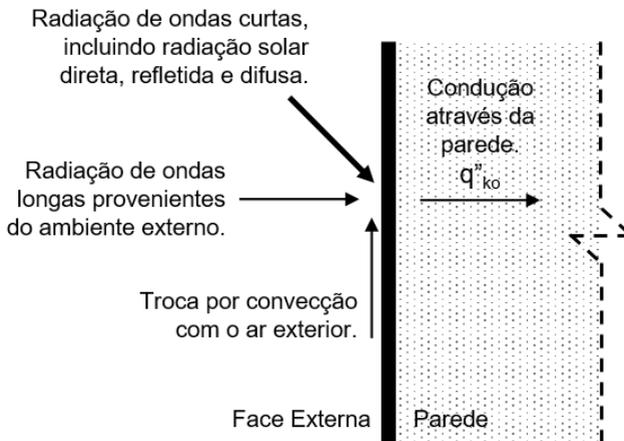
$q''_{\alpha sol}$ = Fluxo de calor por radiação solar (ondas curtas) direta e difusa absorvida.

q''_{LWR} = Fluxo de calor por troca de radiação (ondas longas) com o entorno.

q''_{conv} = Fluxo de calor por trocas convectivas com o ar externo.

q''_{ko} = Fluxo de calor por condução pela parede.

Figura 5 - Diagrama de volume de controle de balanço térmico externo



Fonte: Baseado em DOE (2016).

O fluxo de calor por condução através da parede, ou outros componentes de envoltória em contato com o meio externo, ocorre entre a superfície externa e interna do elemento construtivo. Segundo descrito em DOE (2016), o balanço térmico interno é modelado no *EnergyPlus* considerando simultaneamente quatro componentes de transferência de calor:

a) Condução através da envoltória (paredes, piso, cobertura e aberturas);

b) Convecção com o ar interno;

c) Absorção de radiação em ondas curtas (sendo a principal fonte a radiação solar que ingressa através da janela, mais a pequena parcela advinda da emissão de fontes internas como iluminação); e

d) Troca radiante por ondas longas (absorção e emissão de calor por radiação das superfícies internas, equipamentos e pessoas).

Este balanço é enunciado pela equação (2) e demonstrado na Figura 6.

$$q''_{LW\ x} + q''_{SW} + q''_{LW\ s} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (2)$$

Onde,

$q''_{LW\ x}$ = Fluxo de calor por trocas radiante de ondas longas entre as superfícies da zona.

q''_{SW} = Fluxo de calor por radiação de ondas curtas advindas da iluminação.

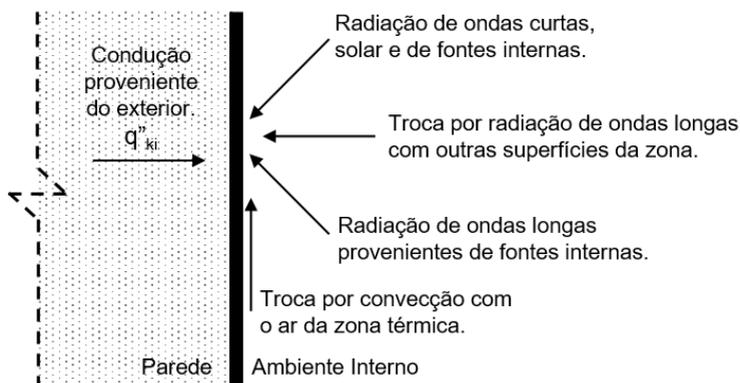
$q''_{LW\ s}$ = Fluxo de calor por radiação de ondas longas provenientes dos equipamentos.

q''_{ki} = Fluxo de calor por convecção através das paredes.

q''_{sol} = Fluxo de calor por radiação solar transmitida ao ambiente e absorvida nas superfícies.

q''_{conv} = Fluxo de calor por convecção no ar interno da zona térmica.

Figura 6 - Diagrama de volume de controle de equilíbrio de calor interno



Fonte: Baseado em DOE (2016).

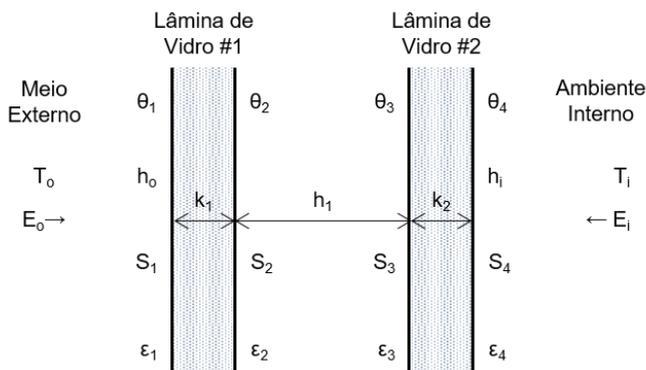
O fluxo de trocas de calor por convecção, descritas na equação (2) como q''_{conv} , é o fluxo no balanço térmico interno o qual resultará em carga térmica para o sistema de condicionamento de ar.

2.2.2 Processos de Balanço Térmico no *EnergyPlus*: Janelas

O balanço térmico nas janelas é realizado considerando a transmissão de calor nas duas superfícies de cada lâmina de vidro, desta forma, o número de equações a serem resolvidas será o dobro do número de lâminas de vidro presentes na composição. Estes cálculos serão realizados para cada intervalo de tempo.

Por exemplo, na Figura 7 observam-se as variáveis de balanço térmico para um vidro insulado duplo. Neste caso haverá quatro equações, duas relativas às superfícies voltadas aos ambientes externo e interno da edificação (S_1 e S_4) e duas às superfícies internas à composição de vidros (S_2 e S_3).

Figura 7 - Variáveis utilizadas nas equações de balanço térmico de sistemas de vidros insulados com duas lâminas.



Fonte: Baseado em DOE (2016).

As equações para esta composição consideram a radiação incidente nas faces externas da composição, e condução e convecção em todas as faces, além da radiação absorvida pelas faces, conforme representadas a seguir. As equações (3) e (6) referem-se ao balanço nas superfícies externas à composição (S_1 e S_4 , sendo S_1 a superfície em contato com o exterior e S_4 a superfície

em contato com o ambiente interno) e as equações (4) e (5), ao balanço nas superfícies internas à composição (S_2 e S_3).

$$E_o \varepsilon_1 - \varepsilon_1 \sigma \theta_1^4 + k_1(\theta_2 - \theta_1) + h_o(T_o - \theta_1) + S_1 = 0 \quad (3)$$

$$k_1(\theta_1 - \theta_2) + h_1(\theta_3 - \theta_2) + \sigma \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} (\theta_3^4 - \theta_2^4) + S_2 = 0 \quad (4)$$

$$h_1(\theta_2 - \theta_3) + k_2(\theta_4 - \theta_3) + \sigma \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} (\theta_2^4 - \theta_3^4) + S_3 = 0 \quad (5)$$

$$E_i \varepsilon_4 - \varepsilon_4 \sigma \theta_4^4 + k_2(\theta_3 - \theta_4) + h_i(T_i - \theta_4) + S_4 = 0 \quad (6)$$

Onde,

E_o, E_i = Radiação de onda longa incidente na janela (exterior, interior).

[W/m²]

ε_n = Emissividade na face n.

σ = Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$). [W/m².K⁴]

θ_n = Temperatura na face n. [K]

k_n = Condutividade do vidro da lâmina n.

h_o, h_i = Condutividade convectiva na ar exterior e interior próximos à janela. [W/m².K]

T_o, T_i = Temperaturas do ar exterior e interior. [K]

S_n = Radiação (de ondas curtas e ondas longas proveniente do sistema de iluminação e equipamentos) absorvida pela face n. [W/m²]

Nos cálculos de balanço térmico através das janelas assume-se que, devido à alta condutividade do material combinada à espessura das lâminas de vidro fina o bastante para que o armazenamento de calor seja desconsiderado, a sua capacidade térmica não é considerada nas equações. Além disso, adota-se que as faces de cada lâmina de vidro são isotérmicas, ou seja, considera-se que toda a face terá a mesma temperatura, sem diferenciação entre centro e bordas da lâmina. O *software* também considera que o fluxo de calor ocorre perpendicularmente ao vidro e é unidimensional.

Nos algoritmos utilizados pelo programa, admite-se que a radiação de onda curta absorvida em cada lâmina de vidro é

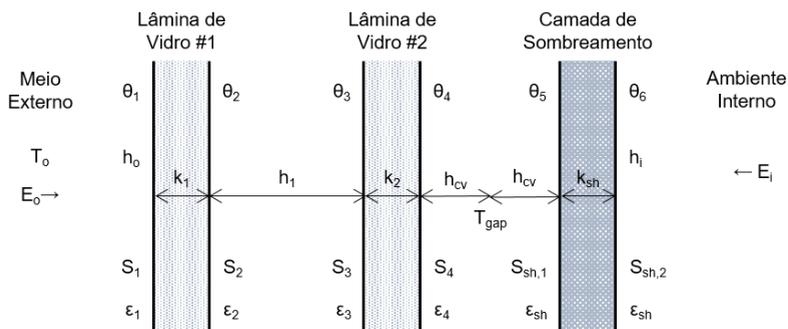
fracionada uniformemente entre suas superfícies. Como ocorre com a maioria dos vidros, admite-se que as camadas deste material são opacas a radiação infravermelha, portanto a radiação térmica proveniente de calor gerado no interior do ambiente será associada apenas a superfície mais interna da composição de vidros.

O modelo de cálculo para vidros insulados considera a deflexão na câmara de gás causada principalmente pela diferença na pressão do gás interno da composição e a pressão no exterior da edificação e no ambiente interno (pressão atmosférica). Este efeito irá influenciar no desempenho térmico do ambiente que será afetado devido à variação na espessura da câmara de gás entre as lâminas de vidro. A transmitância térmica total da composição e o fator solar dos vidros serão os principais fatores de influência no desempenho térmico da composição.

O *EnergyPlus* permite que dispositivos de sombreamento das janelas sejam inseridos ao modelo. Há três opções de posição do sombreamento em relação à janela e o ambiente: externa, interna ou entre lâminas de vidro. O modelo térmico deste elemento irá calcular o fluxo de ar por convecção natural e transferência de calor entre o vidro e o dispositivo de sombreamento, e entre o dispositivo e o meio externo (quando externo ao vidro) ou o ambiente interno (quando interno ao vidro). Incluem-se aos cálculos os efeitos de interações entre o dispositivo de sombreamento, o vidro e o ambiente interno (quando pertinente) quanto aos fluxos de radiação infravermelha, radiação solar direta e difusa e convecção do ar. Considera-se que o elemento de sombreamento é paralelo ao vidro.

Quando um dispositivo de sombreamento é incluído, adicionam-se duas novas equações aos cálculos de balanço térmico nas janelas demonstrados nas equações (3) a (6), uma para cada superfície do elemento. Além disso, a equação da superfície de vidro mais próxima ao dispositivo de sombreamento é alterada. A Figura 8 ilustra uma composição de vidros duplos com dispositivo de sombreamento interno. A equação (7) representa novo cálculo de balanço térmico na superfície de vidro junto ao elemento de sombreamento. As equações (8) e (9) demonstram o balanço térmico nas superfícies do sombreamento voltada ao vidro e voltada ao ambiente interno, respectivamente.

Figura 8 - Variáveis utilizadas nas equações de balanço térmico para sistemas de janelas com duas lâminas de vidro e um dispositivo de sombreamento interno.



Fonte: Baseado em DOE (2016).

$$\frac{E_i \varepsilon_4 \tau_{sh}}{1 - \rho_4 \rho_{sh}} + \frac{\sigma \varepsilon_4}{1 - \rho_4 \rho_{sh}} [\theta_5^4 \varepsilon_{sh} - \theta_4^4 (1 - \rho_{sh})] + k_2 (\theta_3 - \theta_4) + h_{cv} (T_{gap} - \theta_4) + S_4 = 0 \quad (7)$$

$$\frac{E_i \tau_{sh} \rho_4 \varepsilon_{sh}}{1 - \rho_4 \rho_{sh}} + \frac{\sigma \varepsilon_{sh}}{1 - \rho_4 \rho_{sh}} [\varepsilon_4 \theta_4^4 - \theta_5^4 (1 - \rho_4 (\varepsilon_{sh} + \rho_{sh}))] + k_{sh} (\theta_6 - \theta_5) + h_{cv} (T_{gap} - \theta_5) + S_{sh,1} = 0 \quad (8)$$

$$E_i \varepsilon_{sh} - \varepsilon_{sh} \sigma \theta_6^4 + k_{sh} (\theta_5 - \theta_6) + h_i (T_i - \theta_6) + S_{sh,2} = 0 \quad (9)$$

Onde,

T_{sh} = Transmitância difusa de radiação infravermelha do dispositivo de sombreamento.

ε_{sh} = Emissividade difusa do dispositivo de sombreamento.

ρ_{sh} = Refletância difusa de radiação infravermelha do dispositivo de sombreamento (= $1 - (T_{sh} + \varepsilon_{sh})$).

θ_n = Temperatura na superfície do dispositivo de sombreamento voltada ao espaçamento entre o vidro e elemento. [K]

T_{gap} = Temperatura média efetiva do ar no espaçamento entre vidro e dispositivo de sombreamento. [K]

h_{cv} = Coeficiente de condutividade de calor por convecção do vidro ou camada de sombreamento para espaçamento entre os elementos. [W/m².K]

k_{sh} = Condutividade do vidro a camada de sombreamento. [W/m².K]

θ_6 = Temperatura na face da camada de sombreamento voltada ao ar da zona térmica. [K]

$S_{sh.1}$, $S_{sh.2}$ = Soma da radiação solar, da radiação de onda curta da iluminação e da radiação infravermelha de luzes e equipamentos da zona absorvida pela face da camada de sombreamento voltada ao espaçamento com o vidro (1) e voltada a zona térmica (2). [W/m².K]

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS

Besen e Westphal (2012) reforçam a importância em “equilibrar as condições de conforto e consumo a cada projeto e buscar a melhor solução entre os diversos materiais existentes”. O consumo com condicionamento de ar, por exemplo, representa grande parcela do uso energético de edificações de escritórios atualmente. Em seu estudo, Li e Lam (2000) afirmam que, para o clima subtropical de Hong Kong, o condicionamento de ar é responsável por 50 a 60% do consumo energético total deste tipo de edificação, em um clima que requer resfriamento artificial na maior parte do ano, assim como no Brasil. Besen e Westphal (2014) realizaram estudo que considerou o clima de seis cidades brasileiras: Belo Horizonte, Brasília, Curitiba, Fortaleza, Rio de Janeiro e São Paulo. Notou-se que o percentual de participação do condicionamento de ar no consumo energético total do modelo de edifício de escritórios variou entre 35 e 54%. Esta variação foi provocada apenas pelas diferenças climáticas, sendo o maior percentual referente a climas tropicais e o menor a climas subtropicais.

A localização deve ser considerada como uma condicionante nas decisões de projeto que busquem promover o alto desempenho térmico da edificação, principalmente no que se refere ao clima. Westphal (2007) expõe as principais fontes de calor das edificações. Três destas estão relacionadas à ocupação e ao funcionamento da edificação: o calor produzido por pessoas, o sistema de iluminação e os equipamentos. As demais são diretamente ligadas aos fatores climáticos locais: a condução de calor por paredes, cobertura, piso e janelas, o ganho de radiação solar pelas aberturas e a infiltração de ar externo. Uma edificação eficiente termicamente deve ser pensada para responder bem às seguintes variáveis climáticas:

- a) Temperatura do ar;
- b) Umidade relativa;
- c) Radiação solar;
- d) Velocidade e direção dos ventos.

Nas simulações computacionais de desempenho energético de edificações, estes dados são introduzidos por meio de arquivos

climáticos que caracterizam as condições climatológicas de um ano base, a partir de dados horários. Os arquivos climáticos são construídos a partir de informações registradas em estações meteorológicas.

3.1.1 Ocupação e cargas internas

Além dos ganhos de calor oriundos do meio externo à edificação, ligados às condições climáticas, o próprio uso da edificação acarreta em ganho térmico para o ambiente interno. A densidade de carga interna (ILD – *internal load density*) corresponde aos ganhos de calor gerados pelas pessoas, pelo sistema de iluminação e pelos equipamentos, sendo, desta forma, o calor gerado pela ocupação e funcionamento do edifício. Ao exercer algum tipo de atividade, o metabolismo humano trabalha para manter a temperatura interna, por meio da liberação do calor corporal. Ao analisarmos no âmbito da edificação, esse calor liberado é adicionado ao ar interno, aumentando sua temperatura. Desta forma, o ganho térmico por pessoas irá depender da quantidade de usuários no ambiente e as atividades praticadas. O ganho de calor pela iluminação está relacionado à potência do sistema de iluminação artificial, logo é uma função da sua eficiência. O ganho térmico com equipamentos está diretamente relacionado à ocupação, pois se considera a densidade de potência de equipamentos utilizados pelos usuários em suas atividades. (UTZINGER; WASLEY, 1997)

Esta carga térmica gerada no interior da edificação contribui diretamente na demanda ao sistema de condicionamento de ar, que deve retirar o calor produzido. Maiores cargas térmicas geradas no interior da edificação resultam em maior consumo energético para resfriamento e menor consumo para aquecimento. Westphal (2007) analisou o impacto dos parâmetros construtivos e funcionais de modelos de prédios de escritórios no consumo anual para condicionamento do ar. Observaram-se como critérios de maior influência a densidade de carga interna, o padrão de uso (PU) e o coeficiente de performance do sistema de condicionamento (COP). Por exemplo, ao alterar a ILD de 20 W/m² para 50 W/m² o consumo anual de energia elétrica pode atingir até 2,5 vezes o consumo original, dependendo do PU e do COP.

Edificações de escritórios possuem elevada geração de carga térmica interna, a qual coincide com o período do dia com as temperaturas mais elevadas e com o ganho por radiação solar. Portanto, considerando os climas encontrados no Brasil, edifícios com esta função costumam demandar mais energia para resfriamento dos ambientes e por um período maior do ano, quando comparados às residências. Além do consumo energético dos próprios sistemas, a densidade de calor interno gerado na edificação modifica a relação de trocas com o ambiente externo e a influência de parâmetros dos componentes de fachada, como a transmitância térmica (U) e a absorvância dos elementos opacos. A pesquisa de Brandalise (2015) demonstrou que ao se elevar a densidade de carga interna, o fluxo de calor tende a inverter-se. Isto é, com ILD baixo, o fluxo de calor tende a direcionar-se do exterior para o interior da edificação, porém, aumentando-se o calor gerado internamente, este fluxo tende a inverter-se, passando a ser, então, do interior para o exterior.

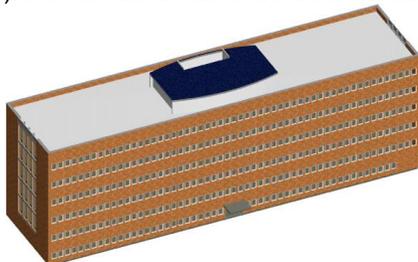
No estudo de Westphal (2007) conclui-se que dependendo da ILD, do PU e da absorvância das superfícies externas, o aumento da transmitância térmica da envoltória poderá promover tanto acréscimo quanto redução no consumo energético da edificação, de acordo com o clima. Isto ocorre pois, em situações com menor ILD, o aumento na resistência térmica das paredes intensifica o bloqueio ao ingresso de calor através da envoltória e diminui o efeito do clima externo no interior da edificação. Por outro lado, em situações de alta ILD, ao diminuir a resistência térmica das paredes, permite-se a dissipação do calor interno para o meio externo, reduzindo a carga de resfriamento.

3.1.2 Orientação solar

Em seu estudo por simulação computacional, Poirazis, Blomsterberg e Wall (2008) analisaram um edifício comercial com tipologia linear em fita (Figura 9) em Gotemburgo, Suécia - local com condições climáticas nórdicas, conforme descrito pelos autores. Para este tipo de edificação, concluíram que a orientação solar não apresenta impacto significativo quando se observa o consumo energético total da edificação, independentemente do tipo de planta.

Para ambientes de escritórios compartimentados, com 30% de área de abertura total da fachada, a influência da orientação foi de 0,9%.

Figura 9 - Vista do modelo de referência de Poirazis, Blomsterberg e Wall (2008). Percentual de abertura da fachada: 30%.



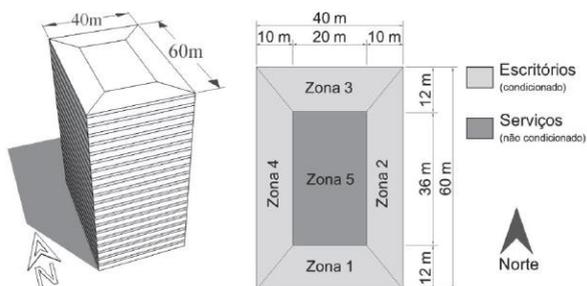
Fonte: Poirazis, Blomsterberg e Wall (2008).

Por outro lado, Lee et al. (2013) realizaram uma pesquisa, por simulação, para edifícios de escritórios em diferentes climas asiáticos. Os autores demonstraram que, ao considerar o consumo energético de cada uma das zonas térmicas voltadas para diferentes orientações solares, a diferença de consumo entre as zonas térmicas de cada fachada pode variar entre 17 e 42% para os cinco climas asiáticos estudados. Dentre os climas estudados, as cidades de Taipé (Taiwan) e Xangai (China) possuem condições semelhantes às encontradas em algumas regiões brasileiras, principalmente no sul. Para estas cidades, a diferença entre o consumo energético nas diferentes zonas fica entre 33 e 42%.

Em estudo sobre o desempenho energético em edifícios de escritórios no Brasil, Andreis (2014) avaliou a influência da orientação do eixo de fachadas com maior área no consumo energético anual para condicionamento térmico. Considerou-se um edifício de 20 pavimentos com dimensões de 60m por 40m, conforme pode ser observado na Figura 10. Em todas as cidades analisadas (Curitiba, Porto Alegre, São Paulo, Brasília, Rio de Janeiro, Salvador e Recife), os modelos com as fachadas mais amplas orientadas na direção norte-sul apresentaram menor demanda energética para condicionamento do ar. A economia desta orientação em relação aos mesmos modelos voltados para direção leste-oeste variou entre 1,4% e 6,3%, sendo as maiores diferenças nas cidades localizadas mais

ao sul do país. Observando-se o modelo utilizado pela autora, levanta-se a possibilidade de que a baixa influência da orientação solar no consumo energético ocorra devido à profundidade das zonas térmicas referentes aos escritórios. Enquanto a ASHRAE Standard 90.1 (ASHRAE, 2007) define que as zonas térmicas limítrofes à fachada tenham largura de 4,57 metros, o modelo desse estudo possui 10 e 12 metros.

Figura 10 - Vista em perspectiva e zoneamento térmico do modelo de simulação



Fonte: Andreis (2014).

3.1.3 Envoltória

Há duas principais propriedades dos elementos de fechamentos opacos externos que influenciam no desempenho térmico de edificações: a absorvância e a transmitância térmica, sendo a primeira diretamente relacionada com a atuação da incidência de radiação solar. A absorvância tem relação com a cor do acabamento e indica qual o percentual total de energia da radiação solar incidente será absorvida na forma de calor pelo elemento construtivo. A transmitância térmica refere-se à quantidade de calor transmitida através do material. Esta propriedade varia em função da condutividade térmica e espessura da composição, além do sentido do fluxo de calor. Em fechamentos transparentes, além da transmitância térmica, o fator solar (FS) do sistema de vidros também terá significativa influência no desempenho térmico da edificação.

Alguns autores apresentam a cobertura como sendo o elemento da envoltória de maior contribuição para o ganho de calor

solar da edificação, pois nele a radiação incide diretamente. Evidentemente, o impacto da cobertura dependerá da tipologia arquitetônica. Carvalho, La Rovere e Gonçalves (2010) analisaram quais elementos da envoltória apresentam maior potencial de redução do consumo de edificações comerciais na cidade do Rio de Janeiro, com ênfase no condicionamento de ar. Utilizaram como modelo base um edifício de escritórios existente de cinco andares (Figura 11). Confirmou-se que, em edificações comerciais em altura, alterações nos materiais aplicados às fachadas (maior área exposta ao ambiente externo) tendem a proporcionar maior impacto no desempenho energético de edificações do que alterações nos materiais das coberturas. As alterações dos materiais da fachada resultaram em redução de até 4,95% no consumo energético para condicionamento de ar, enquanto as alterações na composição de materiais da cobertura geraram redução em até 0,87%.

Os ganhos térmicos por radiação solar ocorrem através da envoltória da edificação, por transmissão direta através dos elementos transparentes ou por absorção e transmissão através dos materiais opacos e, em menor intensidade, através dos materiais transparentes. Da mesma forma que ocorre com a carga térmica interna, o calor solar advindo das trocas do ambiente externo com o interno tem impacto sobre o sistema de condicionamento de ar, que deve retirar esta carga.

Figura 11 - Edifício existente utilizado como caso base em estudo de Carvalho, La Rovere e Gonçalves (2010).



Fonte: Carvalho, La Rovere e Gonçalves (2010).

Deve-se dar atenção especial aos fechamentos transparentes, pois estes elementos promovem elevado ganho de calor solar. Esta propriedade permite trocas de calor mais diretas e intensas do que outros materiais utilizados nos fechamentos externos.

3.2 O VIDRO NAS FACHADAS

Edificações com fachadas totalmente revestidas por vidro já são um modelo de arquitetura corporativa internacionalmente consolidado. No Brasil, este modelo vem sendo seguido desde a década de 1950. Arquitetos, proprietários e usuários justificam a escolha por amplos planos de vidro principalmente por permitir extensa visão do espaço externo, possibilitando maior sensação de integração entre interior e exterior. Ademais, o uso de fachadas envidraçadas também é justificado pela maior admissão de iluminação natural, pela facilidade de limpeza e manutenção deste revestimento, pelo aquecimento solar em períodos de frio, pela agilidade na instalação desta solução construtiva e pela estética do material. Os avanços tecnológicos na fabricação e composição dos vidros têm resultado em produtos com capacidade de controle do ganho de calor solar, tornando-se outro forte fator de incentivo a projetistas e proprietários ao optarem por amplas áreas das fachadas revestidas por este material. (TRAPANO; BASTOS, 2010; HUANG; NIU; CHUNG, 2014; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014)

Ao mesmo tempo em que esta amplitude visual para o ambiente externo é altamente desejável pelos usuários, a área de vidro tem grande influência no consumo energético de edificações. Devido à transparência à radiação solar, os vidros são os elementos de envoltória que ocasionam maiores ganhos de calor. A utilização de grandes panos de vidro pode gerar um aumento significativo na carga térmica da edificação, causando desconforto térmico, maiores gastos com condicionamento de ar e, conseqüentemente, aumento no consumo energético. As dimensões das aberturas e as propriedades térmicas dos vidros afetam a quantidade de radiação solar que ingressa no ambiente e, portanto, devem ser definidas com cuidado.

Outro fator relacionado ao vidro como agente de otimização do desempenho energético de edificações é o clima local. As

propriedades ótimas das janelas, como a proporção entre áreas opacas e transparentes da envoltória, o fator solar do vidro e suas transmitâncias térmica e visível, variam conforme o clima. O projeto de abertura deve ser adequado ao clima local e ao tipo de uso da edificação, pois tem impacto direto no consumo energético. Segundo a ASHRAE (2009), no momento de projeto, as aberturas devem ser definidas considerando “requisitos arquitetônicos, desempenho térmico, critérios econômicos e conforto humano”. Os fechamentos transparentes são considerados o elo mais fraco na transferência de calor entre o espaço externo e o ambiente interno através da envoltória.

3.2.1 O uso de vidros insulados

A internacionalização da arquitetura corporativa no Brasil não transcorre apenas nos modelos arquitetônicos utilizados, mas também nas tecnologias construtivas empregadas. Contudo, o clima local nem sempre é considerado. Os vidros insulados são um exemplo deste cenário. Este sistema é amplamente utilizado em países Europeus e da América do Norte com o propósito de promover eficiência energética e conforto térmico às edificações, residenciais e comerciais. Este fato é notável ao se perceber que pesquisas realizadas nestas áreas, comparando o desempenho de diferentes tipos de vidros, tendem a contrapor apenas diferentes configurações de vidros insulados (duplos e triplos) como em Stegou-Sagia et al. (2007), Poirazis, Blomsterberg e Wall (2008) e Lee et al. (2013).

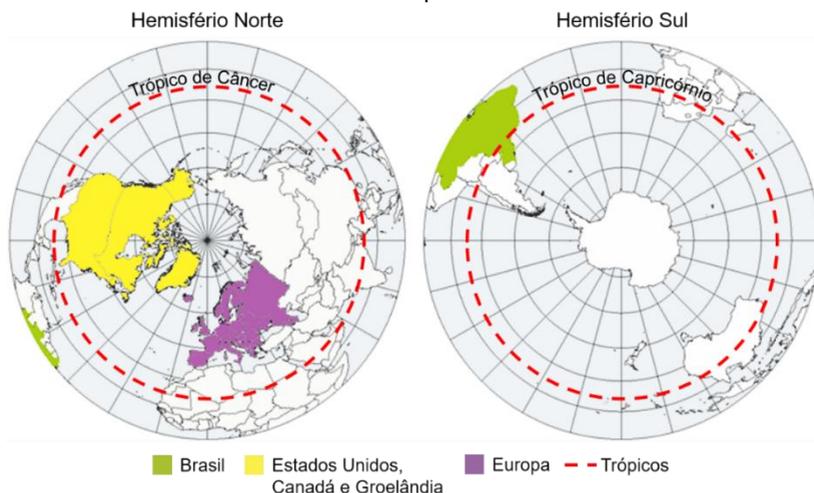
Em estudo realizado em Creta, na Grécia, Tsagarakis, Karyotakis e Zografakis (2012) expõem uma breve revisão sobre políticas de conservação de energia em relação a escolha dos vidros, aquecimento central e condicionamento de ar. Os autores já apresentam o uso de vidro insulado como uma medida de economia de energia, pois alegam contribuir para um consumo energético eficiente com aquecimento, resfriamento e iluminação dos edifícios, bem como na melhoria das condições de conforto térmico e acústico nos ambientes internos. Além disso, o emprego de vidros duplos é obrigatório na Grécia desde 1979, ano em que entrou em vigência a Regulamentação de Isolamento Térmico de Edifícios, satisfazendo requisitos da normatização da União Europeia. Enfatiza-se que o

clima grego se caracteriza por possuir verões quentes e secos, e invernos amenos e chuvosos. No Brasil, os vidros insulados vêm sendo utilizados em edificações comerciais “sem que anteriormente houvesse grandes estudos para avaliar a eficiência de sua adequação aos climas brasileiros” (BESEN; WESTPHAL, 2012).

A latitude do local é um fator determinante na quantidade de radiação solar incidente e, portanto, influencia também na temperatura local conforme variação geográfica. As regiões intertropicais, localizadas entre os trópicos de câncer e capricórnio, têm menor oscilação da intensidade da radiação e da duração dos dias ao longo do ano quando comparadas às regiões de maior latitude, entre trópicos e polos geográficos (PILLAR, 1995).

Como se pode observar na Figura 12, o Brasil está localizado quase em sua totalidade na região intertropical, entre latitudes 33° sul e 5° norte, enquanto a maioria dos países da América do Norte (Estados Unidos, Canadá e Groelândia) e a Europa localizam-se acima dos trópicos, entre as latitudes 25° e 70° norte.

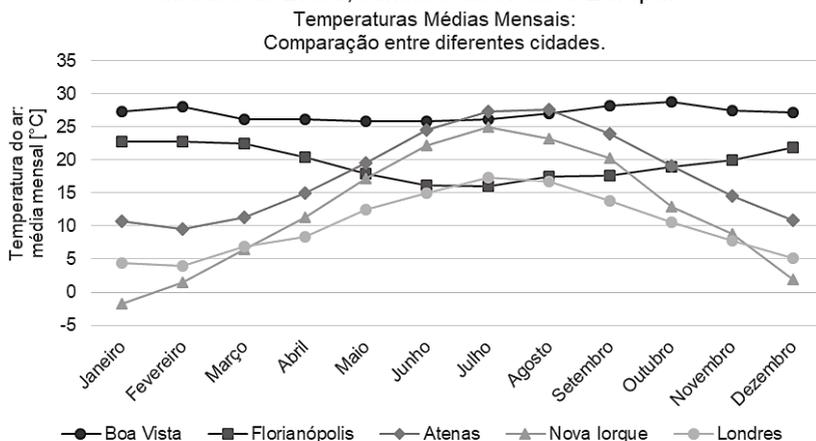
Figura 12 - Localização do Brasil, América do Norte e Europa em relação aos trópicos



Fonte: elaborado pela autora.

Desta forma, os climas brasileiros tendem a apresentar menor variação das temperaturas e condições climatológicas ao longo do ano. Ao passo que os países da América do Norte e Europa tendem a ter invernos mais rigorosos e maior variação do clima nas diferentes estações. Estas diferenças podem ser observadas na Figura 13, onde apresenta-se, como exemplos desta ocorrência, a variação de temperatura média mensal ao longo do ano para as cidades brasileiras Florianópolis e Boa Vista, comparada a Atenas, Nova Iorque e Londres. A amplitude das temperaturas médias mensais de Boa Vista e Florianópolis é de aproximadamente 3°C e 7°C, respectivamente, enquanto a variação entre a maior e menor média mensal chega a 26°C em Nova Iorque (Tabela 3). A partir destes dados, questiona-se a eficácia do uso de vidros insulados como mecanismo de potencialização da eficiência energética e conforto térmico para os climas brasileiros.

Figura 13 - Comparação entre temperaturas médias mensais de diferentes cidades do Brasil, América do Norte e Europa.



Fonte: arquivos climáticos disponíveis em <https://energyplus.net/weather>.

Tabela 3 - Amplitude das temperaturas médias mensais de Boa Vista, Florianópolis, Atenas, Nova Iorque e Londres.

	Boa Vista	Florianópolis	Atenas	Nova Iorque	Londres
Menor Temperatura Média Mensal [°C]	25,90	16,00	9,58	-1,72	3,94
Maior Temperatura Média Mensal [°C]	28,73	22,82	27,59	25,01	17,32
Amplitude [°C]	2,83	6,82	18,01	26,74	13,38

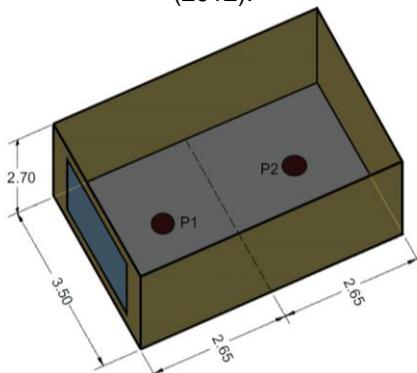
Fonte: arquivos climáticos disponíveis em <https://energyplus.net/weather>.

3.3 INFLUÊNCIA DO VIDRO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIO

Edifícios de escritórios envidraçados costumam operar constantemente com sistema de condicionamento mecânico do ar. Além disso, o pico de carga para refrigeração deste sistema costuma corresponder ao período de ganho máximo de calor por radiação solar. Na literatura relacionada ao desempenho energético de edificações indica-se consenso de que quanto maior for o percentual de transparência da fachada maior será o consumo energético para resfriamento da edificação, mantendo-se o tipo de vidro.

Ochoa et al. (2012) avaliaram critérios de otimização do percentual de abertura das fachadas (*WWR – window-to-wall ratio*) para se obter baixo consumo energético e bons índices de conforto visual, concomitantemente. Considerou-se o clima de Amsterdã, na Holanda, que é classificado como Cfb por Köppen-Genger (clima temperado e úmido, com verão temperado). Simulações computacionais de desempenho de um modelo hipotético de sala de escritório (Figura 14) foram rodadas no programa *EnergyPlus*.

Figura 14 - Modelo hipotético de sala de escritório utilizado por Ochoa et al. (2012).



Fonte: Ochoa et al. (2012).

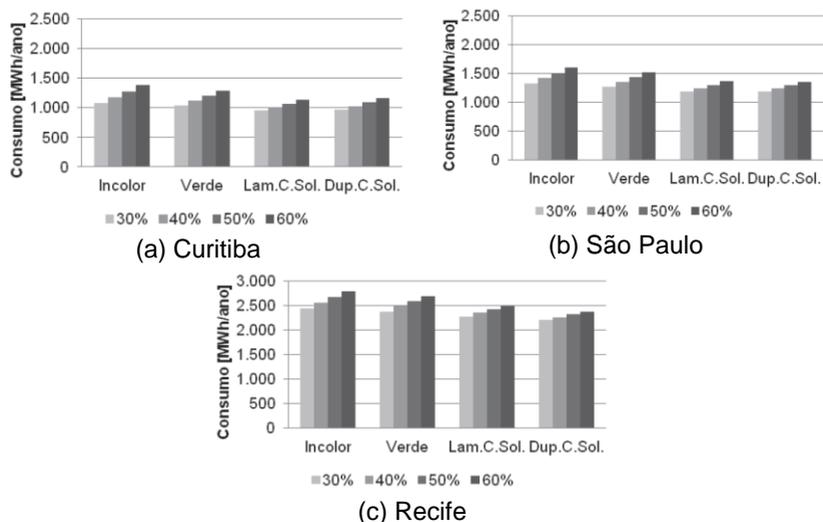
O parâmetro alterado entre os 10 modelos simulados foi o WWR, o qual variou entre 10% e 100%. Com relação aos critérios de avaliação de desempenho energético estimaram-se o consumo energético global, com aquecimento, com resfriamento, com iluminação e com ventilação artificial. Em todos os casos, quanto maior a área de abertura da fachada, maior o consumo com condicionamento térmico da edificação. Quando se analisa o consumo total da edificação, esta lógica não se aplica ao WWR de 10%, pois, neste, o consumo com iluminação artificial amplia-se entre três e cinco vezes maior do que com WWR de 100%.

Entretanto, Andreis, Besen e Westphal (2014) afirmam que, evidentemente, este aumento do consumo energético não é proporcional ao aumento da área de janela, pois existem outras cargas (sistema de iluminação, calor gerado por equipamentos e ocupação) com influência no consumo em condicionamento de ar da edificação. Westphal e Andreis (2016) complementam que, apesar de diretamente correlato ao consumo com condicionamento térmico, a influência do sistema de janelas não dependerá apenas da área de janela, mas também do clima local e do tipo de vidro. Em seu estudo para edifício de escritórios em climas brasileiros, concluíram que ao utilizar vidros de controle solar, o WWR pode ser consideravelmente ampliado com baixo impacto no consumo energético, principalmente em climas quentes. Complementarmente, Poirazis, Blomsterberg e

Wall (2008) afirmam que apesar de os percentuais de abertura da fachada maiores tenderem a causar maior consumo energético para condicionamento do ar, reduzindo a transmitância térmica das janelas esta diferença é reduzida. Assim sendo, é necessário analisar cada caso individualmente, escolhendo adequadamente o tipo de vidro obtém-se maior liberdade na definição da área de abertura da envoltória sem aumentar significativamente o consumo da edificação.

No estudo de Andreis (2014) notou-se que, para um mesmo vidro, alterando-se o WWR de 30% para 60% o aumento no consumo energético para condicionamento de ar ficou entre 7,4% e 27,5%, dependendo da cidade analisada. A alteração do WWR demonstrou menor influência para situação de climas mais quentes (Rio de Janeiro, Recife e Salvador). Em relação ao tipo de vidro, a interferência das variações no WWR é atenuada em modelos com uso de vidros de controle solar. Por exemplo, para a cidade de Curitiba, o uso de vidro duplo de controle solar com WWR de 60% representou um acréscimo de 7% no consumo energético anual para condicionamento térmico comparado ao uso do vidro monolítico transparente com WWR de 30%. Esta mesma relação possui acréscimo ainda menor para São Paulo, Porto Alegre e Brasília, sendo entre 2 e 3%. Para as cidades com climas mais quentes, esta alteração representa economia no consumo energético. Para o Rio de Janeiro a previsão de economia foi de 1%, para Recife foi 3% e para Salvador foi 2%. A Figura 15 expõe de forma gráfica os resultados descritos acima. Este estudo permite perceber, quantitativamente, que utilizar vidros de controle solar propicia o aproveitamento das vantagens atribuídas às fachadas envidraçadas com reduzido impacto no consumo energético da edificação.

Figura 15 - Consumo energético anual do sistema de condicionamento de ar relativo à variação do tipo de vidro e WWR em (a) Curitiba, (b) São Paulo e (c) Recife.



Fonte: Andreis (2014).

A fim de estudar o impacto do vidro no consumo energético de edificações de escritórios, Poirazis, Blomsterberg e Wall (2008) realizaram simulações energéticas de uma edificação de escritórios de seis pavimentos em Gotemburgo, Suécia (Figura 9). Os parâmetros estudados foram a orientação solar (norte/sul, leste/oeste e com rotação a 45°), o tipo de *layout* (aberto ou com divisórias), os *setpoints* de controle de iluminação e condicionamento de ar, o tipo de vidro, o percentual de abertura da fachada (30%, 60% e 100%) e elementos de sombreamento (venezianas internas, intermediárias e externas ao vidro). Testaram-se sete composições de vidros: um vidro triplo transparente; um vidro triplo com revestimento *Low-e* no plano interno e gás argônio entre os painéis interiores e seis vidros duplos variando a transmitância (U) e o fator solar (FS). Optou-se por uma ferramenta computacional de simulação energética dinâmica chamada Ida ICE 3.0, utilizada na Suécia, Finlândia e Suíça. As análises foram realizadas primeiramente comparando as alternativas com o mesmo *setpoint* e, após, por comparação cruzada das

alternativas com diferentes *setpoints*. Os resultados indicam que, para o clima local caracterizado pelos autores como condições nórdicas, janelas com baixa transmitância térmica diminuem a demanda para aquecimento, sem influenciar significativamente a demanda para resfriamento. A alternativa que utiliza composição de janela com $U=1,08\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ proporcionou 35% de economia na demanda por aquecimento em relação a alternativa com conjunto de $U=1,65\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, mas apresentou aumento de 22% na demanda por resfriamento. Por consequência, o consumo total foi menor, resultando em economia de 14%. Utilizar composições com baixo fator solar também influenciaram positivamente na demanda por resfriamento. Comparando a alternativa com $FS=47\%$ com a alternativa com $FS=19\%$, a economia na demanda de energia para resfriamento foi de 55% e a economia na demanda total de energia foi de 12%. A pesquisa analisa apenas um clima e, sendo este um clima de frio rigoroso, somente alternativas de vidros de alto isolamento térmico foram testadas (vidros insulados duplos e triplos).

Na República da Coreia foi realizado um estudo sobre o efeito dos sistemas de janelas no consumo energético para condicionamento de ar e iluminação em edifícios de escritórios em climas asiáticos (LEE et al., 2013). Foram realizadas simulações paramétricas utilizando a interface do programa computacional *Commercial Fenestration/Façade Design Tool* (COMFEN), que utiliza como núcleo de simulação o *software EnergyPlus*. Selecionaram cinco cidades que caracterizam cada um dos cinco climas típicos asiáticos: Manila (Filipinas), Taipé (Taiwan), Xangai (China), Seul (República da Coreia) e Sapporo (Japão). Os parâmetros relacionados foram a orientação solar, o WWR, a transmitância térmica, o coeficiente de ganho de calor solar (*Solar Heat Gain Coefficient* - SHGC) e a transmissão visível (Tabela 4). Nas composições de janelas criadas, utilizaram-se apenas vidros duplos e triplos.

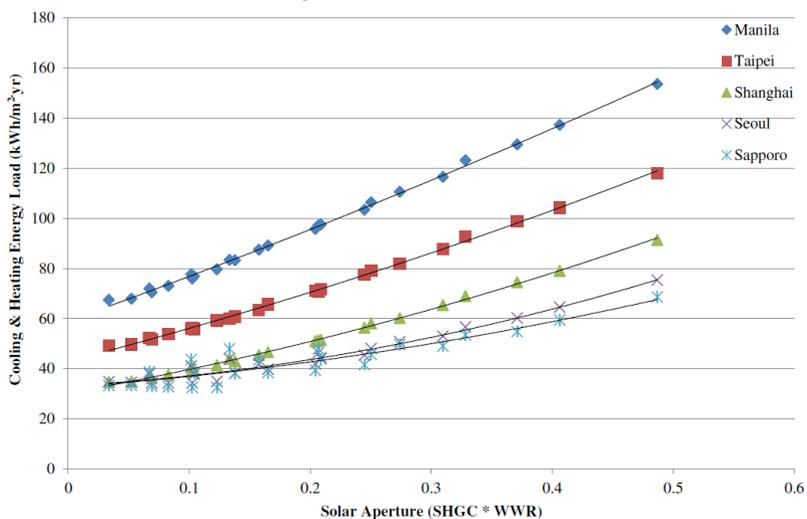
Tabela 4 - Variações dos parâmetros estudados por Lee et al. (2013).

Parâmetro	Variação
WWR	100%
	75%
	50%
	25%
Orientação	Norte
	Sul
	Leste
	Oeste
Clima	Manila (Filipinas)
	Taipé (Taiwan)
	Xangai (China)
	Seul (República da Coreia)
	Sapporo (Japão)

Fonte: Lee et al. (2013).

Das cidades estudadas, Taipé e Xangai possuem classificação climática Cfa (clima temperado e úmido com verão quente), segundo Köppen-Geiger, também encontrada nos climas brasileiros. Para estas cidades, os sistemas de janela com melhor desempenho foram de vidros duplos (menos isolantes que vidros triplos), com WWR de 25 e 50%. Analisou-se a correlação entre SHGC e WWR para os diferentes modelos gerados. Esta relação foi chamada de abertura solar (SHGC multiplicado pelo WWR). Nota-se que, em geral, quanto maior for esta razão, a demanda energética para condicionamento de ar tende a aumentar (Figura 16). Os resultados confirmaram que a obtenção de propriedades ótimas dos vidros está diretamente ligada ao clima local. Por fim, de acordo com os resultados obtidos, as propriedades das janelas e o WWR foram otimizadas para as quatro orientações solares, para cada cidade, com o objetivo de reduzir a demanda energética das edificações de escritórios. O estudo possui gama razoável de variáveis, permitindo boa compreensão do efeito dos sistemas de janelas no desempenho energético de edifícios de escritórios em climas asiáticos. Entretanto, considera apenas vidros insulados (duplos e triplos).

Figura 16 - Consumo anual energético previsto para condicionamento em função da abertura solar.



Fonte: Lee et al. (2013).

Huang, Niu e Chung (2014) estudaram os desempenhos térmico e de iluminação natural em um modelo de edifício de escritórios com ambientes compartimentados para diferentes configurações de janelas. A Figura 17 mostra a configuração de um pavimento tipo deste modelo. Foram analisadas quatro cidades com diferentes climas, todas com necessidade de resfriamento predominante: Singapura, Hong Kong, Miami e Houston. Os autores justificam que 75% da população mundial vive no hemisfério norte, entre as latitudes 20° e 60°, logo esta seleção seria representativa. Contudo, as cidades selecionadas estão localizadas em latitudes entre 0° e 30°. Analisou-se o ganho térmico através das janelas considerando três configurações com o mesmo vidro: vidro simples (caso base – FS = 0,773 e U = 5,785 W/m².K), vidro duplo (FS = 0,638 e U = 2,678 W/m².K) e vidro duplo com revestimento *Low-e* (FS = 0,418 e U = 1,847 W/m².K). A câmara de ar entre as lâminas de vidro possui espessura de 6mm. Os resultados foram obtidos por simulação computacional de desempenho de edificações, operando

os softwares *EnergyPlus* e *Daysim*. Demonstrou-se que, ao inserir uma segunda lâmina de vidro e a câmara de ar, gera-se economia no ganho térmico através da janela de 15 a 20%, considerando estes climas. Esta redução ocorre pelo bloqueio da radiação solar causado pela camada extra de vidro. A introdução do revestimento *Low-e* amplifica ainda mais este efeito, podendo haver redução de quase 50% no ganho térmico pelas janelas.

Figura 17 - Divisões do pavimento tipo do modelo de edifício estudado por Huang, Niu e Chung (2014).



Fonte: Huang, Niu e Chung (2014).

Alguns estudos e discussões sobre o impacto do vidro no desempenho energético e conforto térmico de edificações de escritórios também estão sendo realizados para o Brasil, entretanto não contemplam os climas brasileiros como um todo.

Dentre estudos relacionados a elementos de fachada, Carvalho, La Rovere e Gonçalves (2010) analisaram o efeito da variação do tipo de vidro no consumo de energia elétrica. As análises foram realizadas a partir de uma edificação base existente (Figura 11), localizada no Rio de Janeiro. Este prédio, de cinco pavimentos, possui sistema de fachada de vidro e atua totalmente por condicionamento mecânico do ar. Além do vidro verde reflexivo utilizado no caso base, variou-se em mais quatro configurações de vidros, conforme indicado na Tabela 5. Conjuntamente, foram considerados dois tipos de fechamento da envoltória: (1) sistema de fachada completamente envidraçada, conforme caso base, e (2) com 40% da fachada revestida de vidro e o restante da área em alvenaria pintada em cor clara. O estudo foi realizado por simulação computacional utilizando o software *Visual DOE 2.61* e o arquivo climático do Rio de Janeiro do tipo TMY (*Typical Meteorological Year*).

Tabela 5 - Dados técnicos dos vidros simulados.

Tipo de Vidro	Emissividade		Espessura [mm]	Espessura câm. ar [mm]	SC ¹	LT ²	U ³ [W/m ² K]
	Frontal	Posterior					
Vidro verde reflexivo SS08	0,84	0,40	6	-	0,23	0,080	4,90
Vidro duplo SS08	0,84	0,84	6/6	12,7	0,15	0,073	2,26
Vidro duplo SS08 com argônio	0,84	0,84	6/6	12,7	0,14	0,073	2,02
Vidro duplo <i>Low-e</i>	0,84	0,40	3/6	6,3	0,48	0,682	1,66
Vidro laminado colorido	0,84	0,84	6	-	0,95	0,881	6,17

¹ SC: Shading Coefficient (Coeficiente de Sombreamento)

² LT: Light Transmission (Transmissão Luminosa)

³ U: Transmitância Térmica

Fonte: Traduzido de Carvalho, La Rovere e Gonçalves (2010).

Os vidros duplos obtiveram melhor desempenho energético, com economia de cerca de 2,5% no consumo para condicionamento de ar comparado ao caso base. Ao passo que a utilização do vidro duplo com revestimento *Low-e* representou aumento no consumo para condicionamento de 5,7%. Não se especificou como o vidro *Low-e* foi configurado. Ao utilizar vidros com baixo fator solar, diminuiu-se o ganho de calor decorrente da utilização de grandes áreas de vidro. Evidencia-se que a pesquisa se limita a analisar o efeito da variação do tipo de vidro no consumo de energia elétrica restritamente ao clima do Rio de Janeiro, não contemplando os diferentes climas brasileiros.

Besen e Westphal (2012) realizaram estudo comparando o desempenho energético e conforto térmico em edificações comerciais a partir da utilização de vidros laminados e vidros insulados com fatores solares similares. A fim de entender este comportamento para os climas brasileiros, foram rodadas simulações computacionais, utilizando o *software EnergyPlus*, de um modelo de

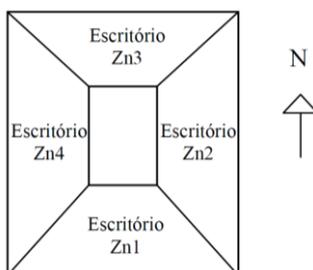
edificação de escritórios típica, com cargas internas conforme Tabela 6, considerando o clima de quatro cidades brasileiras: São Paulo, Rio de Janeiro, Fortaleza e Curitiba. A Figura 18 apresenta o modelo de pavimento de escritório utilizado no estudo. Consideraram-se quatro percentuais de abertura da fachada (PAF): 30%, 40%, 50% e 60%. O conforto térmico das zonas periféricas foi analisado utilizando o modelo estático de conforto térmico de Fanger, que avalia o voto médio predito (PMV - *Predicted Mean Vote*) e o percentual predito de insatisfeitos (PPD - *Predicted Percentage of Dissatisfied*). Visto que se considerou um modelo com climatização artificial, o desconforto térmico foi avaliado pela variação na temperatura radiante média.

Tabela 6 - Cargas internas do modelo de Besen e Westphal (2012).

	Ocupação [m ² /pessoa]	Taxa Metabólica [W/pessoa]	Iluminação [W/m ²]
Escritórios	8	120	12
Áreas comuns	180	120	5

Fonte: Besen e Westphal (2012).

Figura 18 - Zoneamento térmico do pavimento tipo do modelo utilizado por Besen e Westphal (2012). Dimensões: 40 x 60 metros.



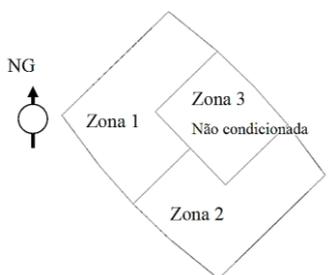
Fonte: Besen e Westphal (2012).

Para São Paulo, o percentual de conforto foi de 83%, para o modelo com vidro laminado, ao passo que este valor aumenta para 91% substituindo-o por vidro insulado. A variação ocorreu na redução do desconforto por frio, que reduziu de 13% para 5%. Observou-se a mesma tendência para Curitiba. No Rio de Janeiro e em Fortaleza, cidades mais quentes onde não houve desconforto por frio, os modelos com vidro laminado e vidro insulado apresentaram níveis de conforto térmico semelhantes. Os resultados demonstraram que o uso de vidros insulados favorece a sensação de conforto nas zonas próximas às fachadas. O isolamento criado pela câmara de ar atenua a interferência da temperatura externa e da radiação solar absorvida pelo sistema na temperatura superficial interna da janela. A vista disto, o vidro insulado tende a diminuir a possibilidade de desconforto térmico localizado.

Quanto ao desempenho energético, avaliou-se o consumo final de energia e a carga de pico do sistema de ar condicionado nas zonas térmicas próximas às janelas. São Paulo, Rio de Janeiro e Fortaleza apresentaram economia entre 0,6% e 1,4% no consumo total de energia comparando os modelos com vidro duplo aos com vidro laminado. Curitiba apresentou maior consumo para resfriamento quando utilizado o vidro duplo, mas o consumo para aquecimento diminuiu, resultando em um consumo global semelhante. Frisa-se a importância na escolha adequada do sistema de janelas para o clima local e para o tipo de edificação. Esta pesquisa é interessante por comparar um vidro laminado e um vidro insulado de fator solar semelhante, isolando o efeito do isolamento térmico proporcionado pela câmara de ar no vidro duplo. Entretanto, a seleção de cidades é restrita e não contempla os climas brasileiros de forma abrangente. O estudo procura analisar de forma completa o desempenho térmico comparando diferentes tipos de vidros, com análise energética e de conforto térmico. Entretanto, nota-se que é um modelo bastante simplificado e não diferencia as áreas próximas às janelas das mais internas. Havendo esta divisão, o estudo de conforto térmico e influência do tipo de vidro no consumo energético poderia ser mais efetivo. Além disso, não analisa as diferenças nos resultados entre as zonas térmicas, de forma que evidenciaria a influência da orientação solar.

Posteriormente, Besen e Westphal (2014) realizaram estudo comparativo de desempenho energético e viabilidade econômica para diferentes tipos de vidros para um modelo de pavimento de edifício de escritórios de fachada envidraçada, com percentual de abertura de 50% (Figura 19). Entre vidros monolíticos, laminados e insulados duplos, foram avaliados 36 tipos de vidro para seis cidades brasileiras: Belo Horizonte, Brasília, Curitiba, Fortaleza, Rio de Janeiro e São Paulo. O desempenho energético foi obtido através de simulações computacionais por meio do *software EnergyPlus* e a economia energética foi definida com base no consumo de energia gerado no modelo com vidro incolor monolítico. A viabilidade econômica, para quatro tipos de vidro, foi definida com base na economia no consumo energético anual. Calculou-se o *payback* simples, o *payback* corrigido e a taxa interna de retorno (TIR).

Figura 19 - Modelo de pavimento de escritórios utilizado por Besen e Westphal (2014).



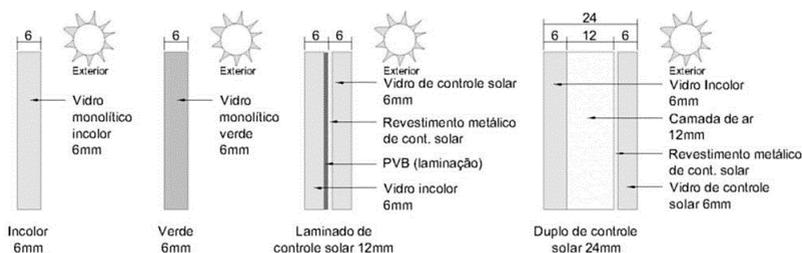
Fonte: Besen e Westphal (2014).

Os modelos de Curitiba e São Paulo obtiveram maior economia anual com energia elétrica utilizando o vidro laminado, com FS de 30% e transmissão luminosa (TL) de 37%. Os resultados de desempenho energético para Brasília e Rio de Janeiro não são apresentados. Fortaleza e Belo Horizonte apresentaram maior economia anual com energia elétrica utilizando o vidro insulado, com FS=18% e TL=13%, quando comparado a utilização do vidro base (vidro monolítico, FS=85% e TL=90%). Entretanto, para todos os casos, o melhor vidro, considerando retorno financeiro, foi o vidro laminado de FS=30% e TL=16%. Para Fortaleza e Belo Horizonte, a

TIR do vidro de maior economia anual em energia elétrica é de 36,3% e 24,7%, respectivamente, à medida que, com o vidro laminado (FS=30 e TL=16), a TIR ficou em 66,2% e 55,9%. Por possuírem custo inicial mais elevado, os vidros insulados tendem a apresentar período de retorno de investimento mais prolongado. O modelo de pavimento de escritórios utilizado ainda é bastante simplificado e não considera diferentes zonas térmicas para cada orientação. Além disso, a zona não condicionada não se encontra localizada no centro do pavimento, fator que o tornaria mais interessante para considerar o tipo de vidro mais adequado por orientação solar. Este estudo ainda não contempla de forma holística, mas torna-se interessante por apresentar estudos de viabilidade econômica para as composições de vidro que obtiveram melhor desempenho energético.

Andreis, Besen e Westphal (2014) estudaram o desempenho energético de fachadas envidraçadas de um modelo de edifícios de escritórios para climas brasileiros. Utilizou-se o mesmo modelo de edificação de Andreis (2014), que pode ser observado na Figura 10. Realizaram-se simulações computacionais paramétricas no software EnergyPlus. Os parâmetros estudados foram o percentual de abertura da fachada (30%, 40%, 50% e 60%), tipo de vidro (incolor 6mm, verde 6mm, laminado de controle solar 12mm e duplo de controle solar 6+12+6mm), tipo de configuração de fachada (exposta ou completamente revestida de vidro), uso de isolante na viga de borda da fachada (com ou sem) e localização do edifício (Curitiba, São Paulo, Porto Alegre, Brasília, Rio de Janeiro, Salvador e Recife). Os tipos de vidros analisados podem ser observados na Figura 20.

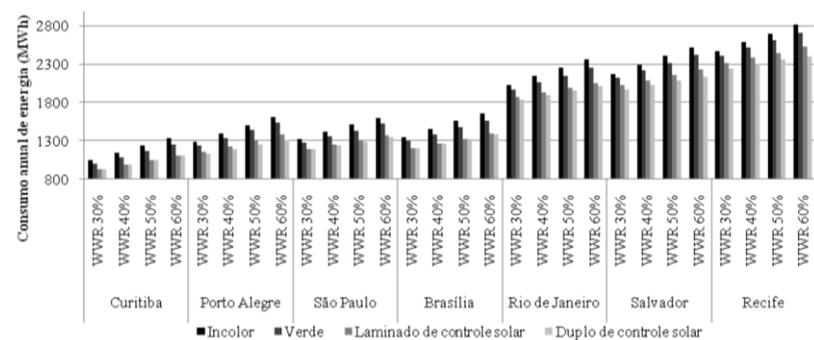
Figura 20 - Configurações de vidros analisadas por Andreis, Besen e Westphal (2014).



Fonte: Andreis, Besen e Westphal (2014).

A medida em que se aumenta o WWR, consequentemente, o consumo para condicionamento de ar é amplificado. Contudo, variando-se o tipo de vidro obtém-se maior liberdade no WWR sem aumentar o consumo. Conforme pode ser observado na Figura 21, utilizando vidros de controle solar com WWR de 60%, em substituição ao vidro incolor com WWR de 30%, obtém-se consumo energético anual semelhante. Visto isto, a escolha adequada do tipo de vidro proporciona maior contato visual com o exterior sem aumentar o consumo da edificação. Assim, é necessário analisar cada caso individualmente. Outro fator a ser considerado é que a relação entre o aumento do WWR e do consumo energético não é diretamente proporcional. Para o dobro de área de vidro, o aumento no consumo ficou entre 10% e 20%, nos climas estudados. O vidro insulado (duplo de controle solar) mostrou-se bom para climas extremos (quentes, no caso do Brasil). Já em climas amenos, este vidro apresentou maior consumo em relação aos vidros laminados, devido à dificuldade de dissipação de calor gerado pela alta densidade de carga interna em edifícios de escritórios.

Figura 21 - Variação do WWR e tipo de vidro X Variação do consumo.



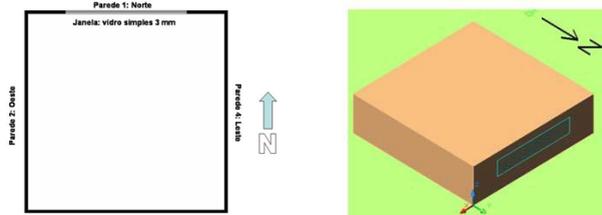
Fonte: Andreis, Besen e Westphal, 2014.

3.4 ANÁLISES DE BALANÇO TERMOENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES

Este item da revisão de literatura tem como objetivo investigar estudos que aplicaram a análise de balanço térmico do ambiente interno com base em dados de fluxo de calor obtidos por simulação computacional operando o *software EnergyPlus*. Observou-se o tipo de edificação estudada, o objetivo em realizar esta análise, o período e frequência dos dados apresentados, quais os dados de saída pedidos na simulação computacional, quais os elementos da edificação avaliados e como os dados foram apresentados. Não se ateve aos resultados e discussões dos estudos, contendo não apenas estudos relacionados a edifícios de escritórios, mas também residenciais.

Em 2005, Batista, Lamberts e Westphal (2005) realizaram um estudo com o objetivo de avaliar a influência do tipo de cobertura utilizada no desempenho térmico de edificações localizadas em Brasília. Utilizou-se o software de simulação computacional *EnergyPlus*, na versão 1.2.1, avaliando um modelo simplificado com um único ambiente, uma janela voltada para norte e área de 100m² (Figura 22). Não se estipulou ocupação do ambiente, apenas uma carga interna constante de 200W. Definiram-se três configurações de coberturas variando a transmitância térmica em 2,00; 0,62 e 0,54 W/m².K. Além disso, estipularam-se três taxas de renovação de ar: 0,0075; 0,075 e 0,15 m³/s. Como resultado das simulações, obtiveram-se dados horários de temperatura do ar interna e externa ao ambiente e de fluxo de calor através das paredes externas (por orientação solar), cobertura, piso, janela, infiltração do ar e cargas internas. Não se especificou quais foram os dados de saída utilizados para análise de fluxo de calor.

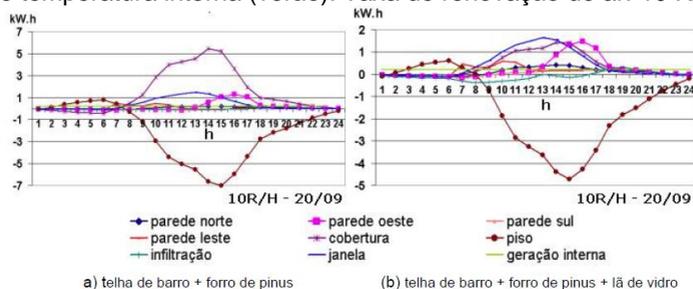
Figura 22 - Planta baixa e perspectiva do modelo de edificação utilizado nas simulações.



Fonte: Batista, Lamberts e Westphal (2005).

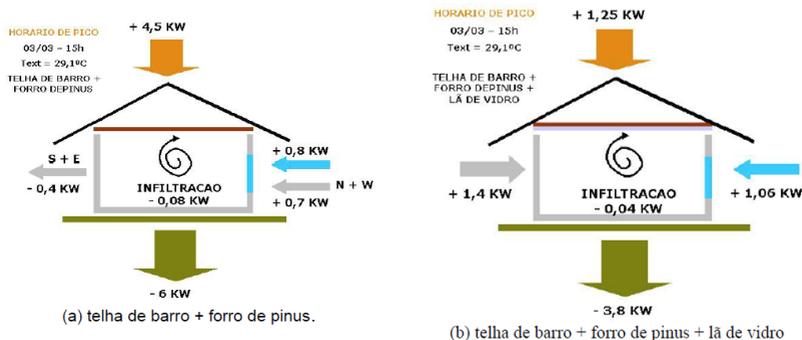
Elaboraram-se dois tipos de análise. Primeiramente verificou-se a variação nas temperaturas internas dos modelos para cada configuração de renovação do ar estabelecendo-se, então, os somatórios de graus-hora para resfriamento. Após, observaram-se as diferenças nos fluxos de calor entre os modelos com o intuito de verificar a influência da variação nos parâmetros. As análises de fluxo de calor foram apresentadas de duas maneiras: (1) por gráficos de linhas com dados horários de perdas e ganhos de calor pelos diferentes elementos, como exemplificado pela Figura 23; e (2) por ilustrações indicando as trocas térmicas no horário de pico na temperatura externa, como exemplificado pela Figura 24. Apesar de muito simplificado, o estudo foi um dos artigos encontrados mais antigos que utiliza dados de fluxo de calor através da envoltória obtidos por simulação computacional, operando o *software EnergyPlus*.

Figura 23 - Fontes de fluxo de calor da edificação ao longo dos dias de pico de temperatura interna (verão). Taxa de renovação de ar: 10 R/h.



Fonte: Batista, Lamberts e Westphal (2005).

Figura 24 - Trocas térmicas na edificação no horário de pico (valores correspondentes às taxas de renovação de ar iguais a 1R/h e 20 R/h).



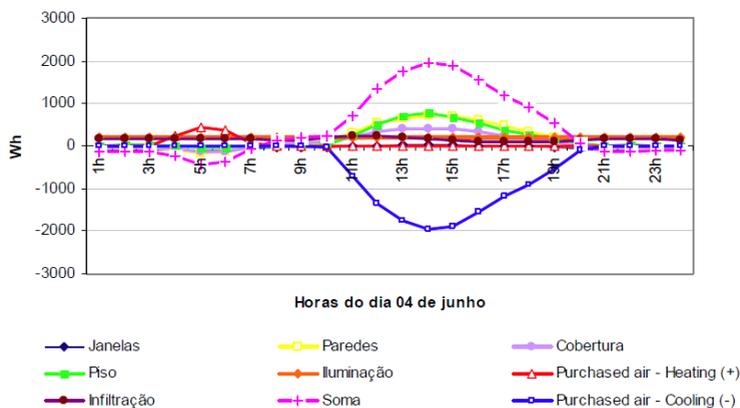
Fonte: Batista, Lamberts e Westphal (2005).

Melo e Lamberts (2008) estudaram uma metodologia para a avaliação da influência dos elementos de envoltória no desempenho térmico de uma edificação observando as cargas térmicas do ambiente interno, por meio de simulação computacional. Utilizou-se como modelo base o Caso 600 do método BESTEST, como Batista, Lamberts e Westphal (2005), variando os componentes de envoltória com base na sua transmitância e inércia térmicas para as cidades Denver, nos Estados Unidos, e Florianópolis, no Brasil. Não se consideraram cargas de ocupação e equipamentos, adicionou-se apenas 200W de potência instalada de iluminação e taxa de infiltração de 0,018m³/s. Definiu-se um sistema de condicionamento de ar do tipo *purchased air*, o qual calcula automaticamente os valores ideais de carga térmica necessária para manutenção no *setpoint* de temperatura interna estipulado.

Os autores utilizaram como base para as análises de balanço térmico o método Etha, o qual considera os ganhos de calor no ambiente interno da edificação, para desenvolver um procedimento de cálculo do balanço térmico por meio do *software EnergyPlus*, utilizado na versão 2.0, fundamentando-se nas trocas de calor por convecção entre as superfícies do ambiente e o ar interno. O balanço termo energético foi analisado de duas maneiras. Primeiramente observando-se as perdas e ganhos de calor através das janelas,

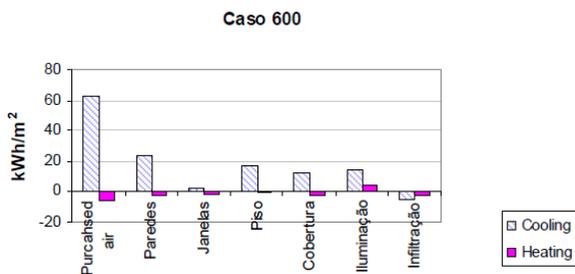
paredes, cobertura, piso, sistema de iluminação e infiltração (indicando também a soma destas trocas) e cargas térmicas para resfriamento e aquecimento. Estes fluxos de calor são apresentados por meio de gráfico de linhas para um dia específico, utilizando dados horários, como pode ser observado na Figura 25. Após são apresentados gráficos de barras indicando a soma anual de carga térmica para aquecimento e resfriamento requisitada pelo sistema de condicionamento para manter a temperatura interna, por fonte de calor. A Figura 26 exemplifica esta análise.

Figura 25 - Balanço térmico para Denver, no dia 4 de junho.



Fonte: Melo e Lamberts (2008).

Figura 26 - Influência da transmitância térmica. Caso 600, Florianópolis. Carga térmica: 3.940 kWh.



Fonte: Melo e Lamberts (2008).

Batista (2011) realizou um estudo sobre o potencial da ventilação mecânica noturna em residências como recurso para resfriamento durante o verão. O objeto de estudo foi uma residência experimental localizada na cidade de Florianópolis, chamada Casa Eficiente (Figura 27). As análises foram realizadas por meio de simulação computacional de desempenho termo energético, utilizando o programa *EnergyPlus*. Em diferentes etapas, variaram-se parâmetros relacionados à inércia térmica dos componentes de envoltória, aos padrões de ventilação natural diurna e mecânica noturna e às especificações de uso e ocupação dos ambientes.

Figura 27 - Vista externa da Casa Eficiente (fachada Norte).

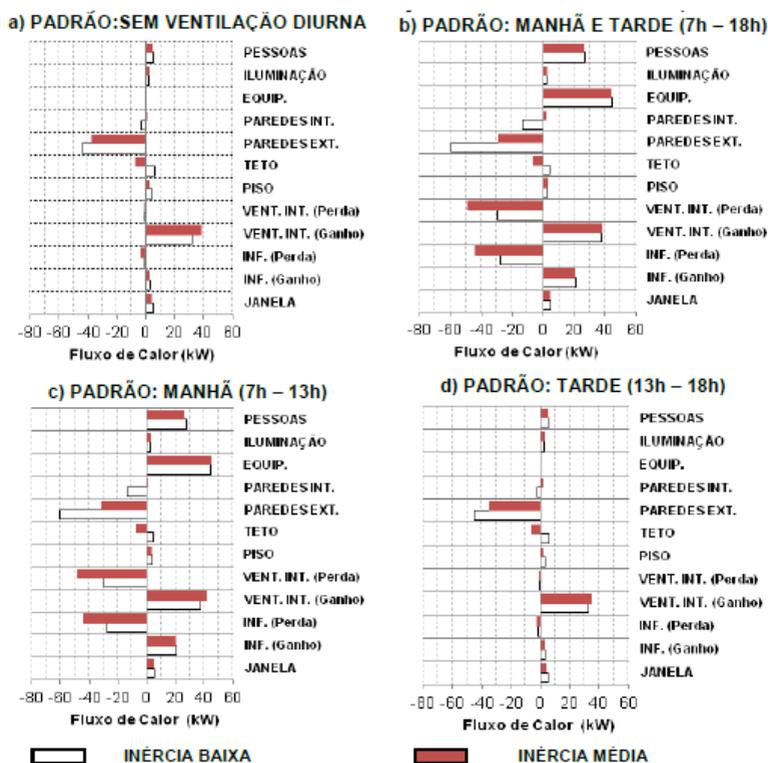


Fonte: Batista (2011).

Entre os estudos realizados por Batista (2011), analisou-se o balanço térmico de cada modelo para quatro intervalos horários, considerando o período do dia e o padrão de ventilação, para o verão (dezembro a março). Dentre os processos de transferência de calor que ocorrem nas edificações (condução através dos elementos construtivos, convecção pelo ar e trocas por radiação) a autora avalia os fluxos de convecção obtidos na simulação (*convective heat gain*). Justifica-se esta escolha por ser neste processo em que são realizadas as trocas de calor com o ar interno do ambiente. Os resultados de balanço térmico foram apresentados através de gráficos de barras representando o fluxo de calor em cada modelo e

intervalo horário, somando-se os fluxos de cada janela diária para os 121 dias do período de verão, como pode ser observado na Figura 28. Cada gráfico compara os fluxos entre o modelo de baixa e média inércia. Os valores positivos representam ganho de calor no ar do ambiente interno e os negativos, perda de calor do ar interno. Esta análise teve como principal objetivo identificar a contribuição de cada componente do edifício no balanço térmico do ambiente interno, além de demonstrar o impacto das diferentes estratégias de ventilação no desempenho térmico do ambiente.

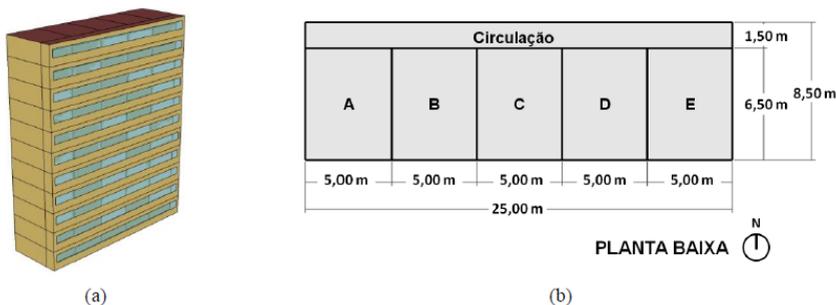
Figura 28 - Balanços térmicos do ambiente no intervalo de 7h-13h, modelos ventilados à noite (10 renovações/h), sob diferentes padrões de ventilação diurna, nos meses de dezembro a março.



Fonte: Batista (2011)

Didoné, Wagner e Pereira (2014) realizaram um estudo com o objetivo de investigar as potencialidades em se converter edifícios de escritório brasileiros em edifícios de energia zero por meio de estratégias de redução de consumo e uso de tecnologia fotovoltaica. Como objeto, definiu-se um edifício de escritório representativo com onze pavimentos de 200m² de área. Cada pavimento é composto por 5 salas dispostas em fita com um corredor lateral (Figura 29). A fim de atender o objetivo proposto, o estudo foi realizado por meio de simulação computacional, operando os *softwares Daysim* e *EnergyPlus*, e foi dividido em três etapas. Primeiramente o caso protótipo foi simulado e seu consumo de energia total é utilizado como referencial para comparação com os demais modelos. A partir do caso protótipo desenvolveu-se um caso otimizado, com base nos requisitos para obter-se o nível A em eficiência energética disposto no Regulamento Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (RTQ-C). O caso energia zero foi conseguido por meio do uso de tecnologias fotovoltaicas.

Figura 29 – (a) Perspectiva e (b) planta baixa do edifício de escritório representativo.

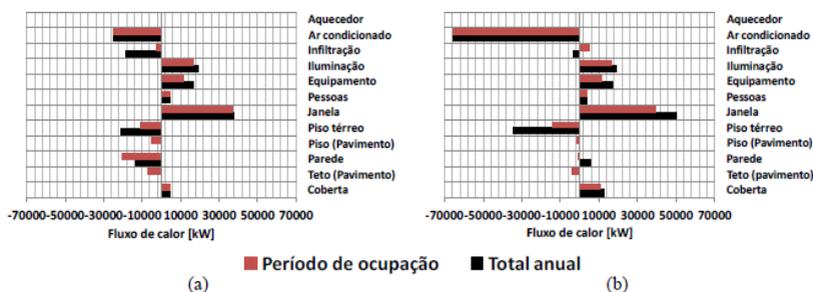


Fonte: Didoné, Wagner e Pereira (2014).

Para a definição dos modelos de cada etapa analisaram-se os resultados de balanço térmico do modelo da etapa anterior. A análise do balanço térmico permite avaliar os fluxos de calor através das superfícies e os ganhos de calor gerados internamente, identificando-se os maiores influenciadores na carga térmica do sistema de condicionamento de ar. Esta análise foi realizada com o intuito de

propor melhorias que reduzam o consumo energético, principalmente no que se refere ao ar condicionado. Os resultados de balanço térmico foram apresentados em forma de gráficos de barras para cada fonte de calor. Apresentou-se a soma do fluxo de calor anual total e considerando apenas o período ocupado, como exemplificado pela Figura 30. Os resultados relacionados ao balanço térmico demonstraram que, ao longo das etapas, as reduções mais relevantes no consumo energético ocorrem na iluminação e no resfriamento. A redução nos ganhos através das janelas foi o principal fator de diminuição no consumo com ar condicionado.

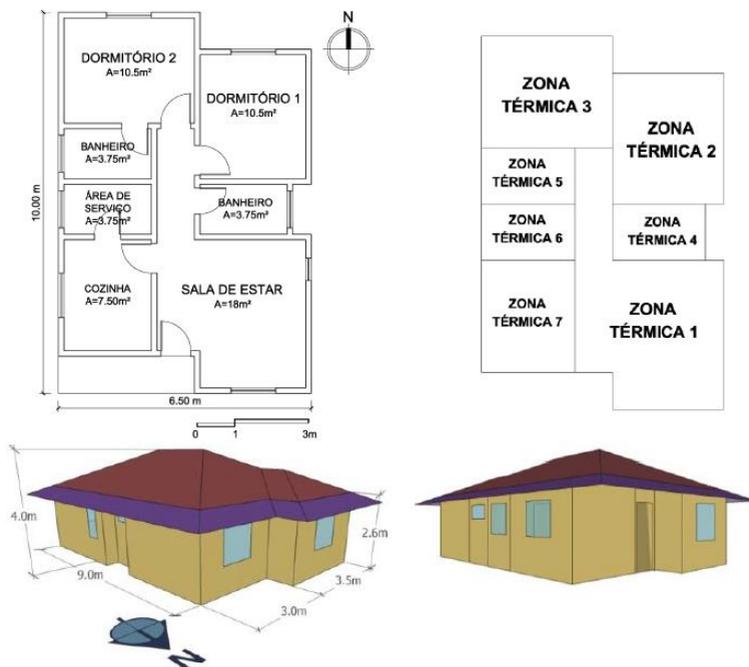
Figura 30 - Balanço térmico do edifício para o caso protótipo em (a) Florianópolis e (b) Fortaleza.



Fonte: Didoné, Wagner e Pereira (2014).

O estudo de Linczuk (2015) buscou verificar a interferência do uso de estratégias de condicionamento passivo recomendadas para residências em climas frios na temperatura interna da edificação no período de verão e inverno. Para tanto, estudou-se o comportamento térmico de uma residência unifamiliar térrea (Figura 31) por meio de simulação computacional com o programa *EnergyPlus*. Consideraram-se três cidades de clima temperado do sul do Brasil: Curitiba (PR), São Joaquim (SC) e Santa Maria (RS).

Figura 31 - Planta baixa, divisão das zonas térmicas e perspectivas do caso base.

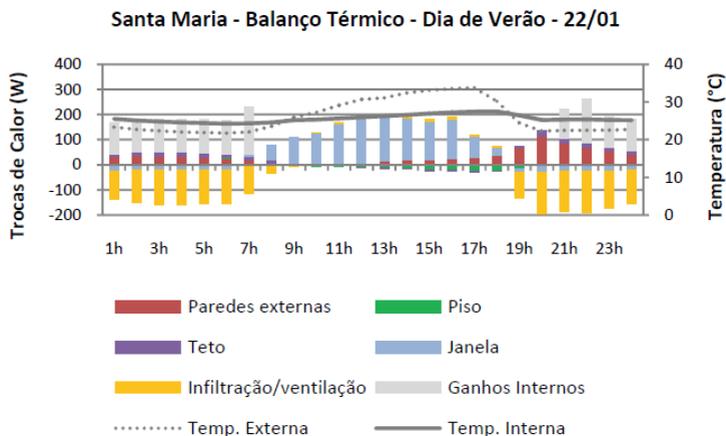


Fonte: Linczuk (2015).

Realizaram-se análises do balanço térmico da residência e do impacto de alterações em parâmetros construtivos da envoltória. As verificações de balanço térmico tiveram como objetivo reconhecer as fontes de ganho e de perda de calor pela envoltória da residência, utilizando como base os resultados horários de fluxos de calor entre as superfícies da zona térmica e o ar do ambiente (fluxos convectivos) e dos ganhos internos de calor (pessoas, iluminação e equipamentos). Analisou-se o comportamento térmico de um dos quartos da residência em um dia típico de verão e um de inverno para cada cidade. Estes dias foram selecionados de dentro da semana típica de cada estação definida nos próprios arquivos climáticos utilizados. Os resultados foram apresentados de duas maneiras. Primeiramente por gráficos de colunas empilhadas indicando os

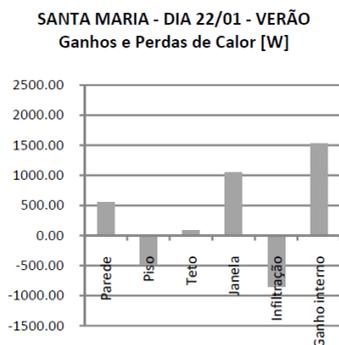
ganhos e perdas horários, por fonte/elemento, ao longo de um dia, relacionado com a variação de temperatura interna e externa. Esta análise pode ser exemplificada pela Figura 32. Após, os fluxos totais foram apresentados por componente de um dia, por meio de gráficos de colunas, conforme Figura 33.

Figura 32 - Balanço térmico da semana típica de verão para Santa Maria.



Fonte: Linczuk (2015).

Figura 33- Balanço Térmico para um dia da semana típica de verão para Santa Maria.



Fonte: Linczuk (2015).

A Tabela 7 apresenta um resumo das análises de balanço térmico com base em dados obtidos por simulação computacional utilizando o programa EnergyPlus realizadas pelas referências de literatura citadas neste item.

Tabela 7 - Resumo de estudos de referência que utilizaram análise de Balanço Térmico com base em dados de simulação computacional com o *EnergyPlus*.

Estudo	Função da Edificação	Objetivo da Análise	Período de Análise	Frequência dos Dados	Elementos Avaliados	Dados de Saída	Apresentação dos Dados
Batista, Lamberts e Westphal (2005)	Residencial (caso 600 BESTEST)	Verificar a influência da variação dos parâmetros no fluxo de calor do ambiente.	Um dia e uma hora (picos de temperatura)	Dados horários.	Paredes externas (por orientação solar); Cobertura; Piso; Janela; Infiltração do ar; Cargas internas.	Não especificado.	Gráficos de linhas e ilustrações indicativas.
Melo e Lamberts (2008)	Não especificado (caso 600 BESTEST)	Analisar os fluxos de calor através dos elementos opacos da envoltória.	Um dia de referência e um ano.	Dados horários e soma anual.	Janelas; Paredes; Cobertura; Piso; Iluminação; Infiltração e Carga térmica do sistema de condicionamento de ar.	Temperatura nas superfícies; Temperatura do ar; Ganho de calor pela iluminação e infiltração do ar externo.	Gráficos de linhas e de colunas.
Batista (2011)	Residencial (balanço térmico da edificação inteira)	Identificar a contribuição dos componentes do edifício no balanço térmico do ambiente e o impacto de estratégias de ventilação no	Intervalos horários diários de dezembro a março.	Soma total para cada período horário.	Pessoas; Iluminação; Equipamentos; Paredes internas; Paredes externas; Teto; Piso; Ventilação interna (perda e ganho); Infiltração	Fluxos de calor por convecção. Não especificou os dados de saída.	Gráficos de barras.

		desempenho térmico do ambiente.			(perda e ganho); Janelas.	"Convective Heat Gain".	
Didoné, Wagner e Pereira (2014)	Escritórios (balanço térmico e energético da edificação inteira)	Avaliar os fluxos de calor através das superfícies e os ganhos de calor gerados internamente, identificando os maiores influenciadores na carga térmica do ar condicionado.	Um ano de referência.	Soma total do ano de referência.	Aquecedor; Ar condicionado; Infiltração; Iluminação; Equipamentos; Pessoas; Janelas; Piso térreo; Piso (pavimento); Paredes; Teto (pavimento); Cobertura.	Não especificado.	Gráficos de barras.
Linczuk (2015)	Residencial (balanço térmico de zona térmica - dormitório)	Reconhecer as fontes de ganho e de perda de calor pela envoltória da residência.	Um dia de referência de verão e um de inverno.	Dados horários.	Paredes externas; Piso; Teto; Janela; Infiltração/ventilação; Ganhos internos.	Fluxo de calor entre superfícies e o ar interno + ganhos internos.	Gráficos de colunas.

3.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO DE LITERATURA

Esta revisão de literatura buscou compreender os fatores que influenciam no desempenho energético de edificações de escritórios e o papel da escolha adequada do tipo de vidro a ser especificado em projeto. Procurou-se entender a influência da escolha do sistema de vidros no desempenho térmico deste perfil de edifícios. Também se buscou referências de estudos que realizaram análises de balanço térmico do ambiente interno, fundamentado em dados obtidos por meio de simulação computacional com o *EnergyPlus*.

Os fatores arquitetônicos e de funcionamento que influenciam no desempenho termoenergético do edifício são, principalmente, sua ocupação, orientação solar e materiais empregados na envoltória. Evidencia-se a importância da definição dos materiais de envoltória fundamentada pelo clima local, pois os fluxos de calor da edificação são diretamente condicionados pelas variáveis climáticas.

Entretanto, nota-se que a arquitetura internacional e as tecnologias e materiais utilizados vêm sendo importados para o Brasil sem haver estudos a respeito do desempenho destes nos climas brasileiros. O uso do vidro insulado é um exemplo deste cenário. São amplamente utilizados em países Europeus e da América do Norte com o propósito de promover eficiência energética e conforto térmico às edificações, residenciais e comerciais. Este fato é notável ao se perceber que pesquisas realizadas nestas áreas, comparando o desempenho de diferentes tipos de vidros, tendem a contrapor apenas diferentes configurações de vidros insulados (duplos e triplos).

Estes climas, em geral, não correspondem aos climas brasileiros, que tendem a apresentar menor variação das temperaturas e condições climáticas ao longo do ano. Neste contexto, questiona-se a eficácia do uso de vidros insulados, caracterizado principalmente pelo isolamento térmico proporcionado pela câmara de ar, como mecanismo de potencialização da eficiência energética e conforto térmico para os climas brasileiros.

Alguns estudos avaliam o impacto do vidro no desempenho térmico de edificações de escritórios para os climas brasileiros,

também considerando o uso de vidros insulados. Entretanto algumas limitações podem ser observadas:

a) Os estudos não contemplam a variedade climática brasileira. Ao estudar o impacto do uso de vidros insulados considerando um número significativo de cidades que abranja melhor os diferentes climas encontrados no país, obtém-se maior representatividade dos resultados gerados.

b) As análises são realizadas prioritariamente em relação ao desempenho energético. Não foram encontradas análises que associem desempenho energético e balanço térmico nos ambientes relacionados à variação no tipo de vidro utilizado.

As análises de balanço térmico consideram os fluxos de calor que ocorrem entre o ar no interior do ambiente e suas superfícies, as quais sofrem influência do meio externo. Esta investigação possibilita verificar a contribuição dos componentes do edifício na sua carga térmica, reconhecendo as fontes de ganho e perda de calor. Além disso, permite avaliar a influência da alteração de determinados parâmetros construtivos nos fluxos de calor no ambiente.

4 MÉTODO

Neste estudo, propõe-se uma pesquisa exploratória, de caráter empírico, na qual se avaliará o desempenho térmico de um pavimento típico de edifícios de escritórios condicionado artificialmente nos climas brasileiros. A previsão de consumo de energia elétrica foi obtida por meio de simulação computacional de desempenho da edificação, utilizando o *software EnergyPlus*.

Para tanto, o estudo foi definido em seis etapas, detalhadas posteriormente:

- a. Seleção dos climas (item 0);
- b. Caracterização e modelagem do modelo de edificação base (item 4.2);
- c. Especificação dos parâmetros variáveis (item 4.3);
- d. Simulação computacional (item 4.4);
- e. Análise de desempenho energético (item 4.5);
- f. Análise de balanço térmico (item 4.6).

4.1 SELEÇÃO DOS CLIMAS

Recomenda-se, por meio da norma ABNT NBR 15.220:3 (ABNT, 2005b) um Zoneamento Bioclimático Brasileiro que poderia ser utilizado como base para a seleção de cidades representativas para este estudo. Entretanto, apesar de amplamente utilizado como base em pesquisas de desempenho energético para edificações independentemente da sua função, esta classificação é direcionada ao desempenho térmico de residências naturalmente ventiladas. Além disso, a divisão das zonas baseou-se nas médias mensais das temperaturas do ar externo máximas e mínimas e nas médias mensais de umidade relativa, sem considerar a radiação solar incidente. Portanto, entendeu-se que esta classificação não seria adequada aos objetivos desta pesquisa.

Optou-se por selecionar as cidades com base nos principais fatores climáticos que influenciam no desempenho de um vidro: a radiação solar incidente na fachada das edificações e a diferença entre a temperatura do ar interna e externa. Desta forma, as cidades foram escolhidas com base na variabilidade da radiação solar global horizontal e da temperatura do ar ao longo do ano.

Em primeira seleção, optou-se pelas capitais das unidades federativas brasileiras. Escolheram-se estas cidades uma vez que as capitais tendem a ser os centros comerciais e financeiros dos seus estados. Como segundo fator de seleção, percebeu-se a necessidade de que a amostra contemplasse diferentes latitudes do território nacional, visto que esta variação influencia no ganho de radiação solar. Desta forma, as cidades foram divididas em grupos conforme sua latitude, desmembrando o território brasileiro a cada 5°, sendo de -35° a +5°.

Dentre estas cidades, verificou-se as que possuem arquivos climáticos para simulação computacional e quais os tipos de arquivos. Caso não possuísse arquivo climático, a cidade seria desconsiderada da lista original, pois este tipo de arquivo é requisito essencial para a simulação computacional de desempenho termo energético de edificações. Os demais critérios de seleção estão relacionados à radiação solar e à temperatura externa do ar, como descritos a seguir.

4.1.1 Radiação Solar Global Horizontal

O Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2006) foi desenvolvido em parceria do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) com colaboradores da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e teve como objetivo aprimorar a base de dados sobre incidência e disponibilidade de radiação solar no território brasileiro. Os valores de radiação solar média utilizados como critério de definição da amostra de cidades para este estudo foram obtidos por meio de observação dos mapas solarimétricos brasileiros disponíveis neste Atlas.

Os mapas utilizados como base possuem uma escala com 12 intervalos de radiação solar global horizontal (em kWh/m²), variando entre zero e maior do que 6,65 kWh/m². As médias de radiação de cada cidade foram registradas utilizando esta escala. Registraram-se as médias anuais de radiação solar, por observação do mapa Radiação Solar Global Horizontal Média Anual (Figura 34), e as médias sazonais (trimestrais) de radiação solar, verificando os quatro mapas de Radiação Solar Global Média Sazonal (Figura 35).

Além disso, atribui-se um valor inteiro para cada um dos intervalos da escala de radiação presente nos mapas (de 1 a 12).

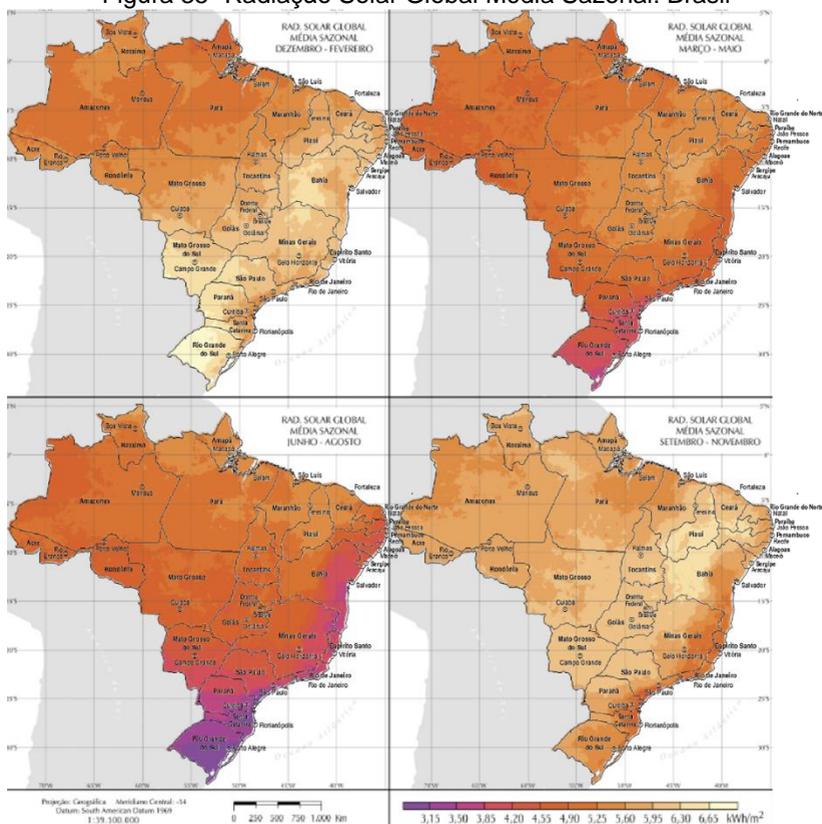
Obeve-se o grau de variação anual de cada cidade a partir da diferença da escala de radiação do trimestre com maior média e do trimestre com menor média. Por exemplo, para a cidade de Porto Alegre, o período com maior média de radiação é no verão (intervalo entre 6,30 e 6,65 kWh/m², equivalente a escala 11) e o período com menor média de radiação é no inverno (intervalo entre 0 e 3,15 kWh/m², equivalente a escala 1), desta forma, a variação anual é de 10 pontos, ou seja, 10 intervalos.

Figura 34 – Radiação Solar Global Horizontal Média Anual: Brasil



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2006).
Adaptado pela autora.

Figura 35- Radiação Solar Global Média Sazonal: Brasil



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2006).
Adaptado pela autora.

4.1.2 Temperatura Externa do Ar

As principais características do vidro insulado são o isolamento acústico e térmico em relação a outras composições de vidros com espessuras significativamente menores. O isolamento térmico diminui o efeito da temperatura externa sobre a temperatura interna e no uso do sistema de condicionamento de ar para ambientes condicionados artificialmente. Assim, é importante considerar a variação de temperaturas entre as cidades.

Para este critério foram utilizados os dados de temperatura externa do ar provenientes dos arquivos climáticos de cada cidade, priorizando os arquivos do tipo SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) para os casos em que a cidade possui mais de um tipo de arquivo climático. Observaram-se as temperaturas médias anuais e os desvios padrão das temperaturas médias diárias ao longo do ano.

4.1.2.1 Temperatura Média Anual

A temperatura média anual de cada cidade foi obtida utilizando média aritmética entre os valores horários de temperatura externa presentes nos arquivos climáticos, conforme equação (10). Neste caso, a amostra é o conjunto de valores de temperatura horária para um ano inteiro, ou seja, $n = 8760$.

$$\bar{x} = \frac{(\sum_{h=1}^{8760} x_h)}{8760} \quad (10)$$

Sendo,

\bar{x} = média aritmética da temperatura do ar.

x_h = temperatura na hora h .

h = tamanho da amostra.

4.1.2.2 Desvios Padrão das Temperaturas Médias Diárias

Os desvios padrão das temperaturas médias diárias ao longo do ano foram obtidos conforme equação (11). Neste caso, a amostra é o conjunto de valores de temperatura média de cada dia do ano, ou seja, $n = 365$.

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (11)$$

Sendo,

s = desvio padrão.

x_i = valor de temperatura no dia i .

\bar{x} = média aritmética da temperatura do ar.

n = tamanho da amostra.

4.1.2.3 Classes de Frequência Estatísticas

Dividiram-se as temperaturas médias diárias em classes de frequências com o objetivo de criar uma classificação para as cidades. Os valores de temperatura média anual e desvio padrão da temperatura média diária de cada cidade foram classificados conforme escalas obtidas pelo método de classes estatísticas.

Primeiramente definiu-se o número de classes nas quais os dados amostrais foram distribuídos. Para tanto, utilizou-se a equação (12) e o resultado foi arredondado para o número inteiro imediatamente superior.

$$K = 1 + 3,33 \log n \quad (12)$$

Sendo,

K = número de classes.

n = número de dados amostrais.

O tamanho de cada classe é delimitado dividindo o campo de variação dos dados amostrais pelo número de classes (K), conforme equação (13). O campo de variação é a diferença entre o maior e o menor valores encontrados na amostra.

$$TC = \frac{CV}{K} \quad (13)$$

Sendo,

TC = tamanho da classe.

CV = campo de variação.

Por fim, o limite inferior do primeiro intervalo foi fixado de acordo com a equação (14), arredondando o resultado para um número inferior.

$$L_i = x_i - \frac{(K \times TC) - CV}{2} \quad (14)$$

Sendo,

L_i = limite inferior do primeiro intervalo.

x_i = menor valor da amostra.

Desta forma, as classes são estabelecidas somando o tamanho da classe ao limite superior da classe anterior, como demonstrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Intervalos de Classes

Classe	Intervalo	
1	$L1, inferior = Li$	$L1, superior = L1, inferior + TC$
2	$L2, inferior = L1, superior$	$L2, superior = L2, inferior + TC$
3	$L3, inferior = L2, superior$	$L3, superior = L3, inferior + TC$
n	$Ln, inferior = Ln-1, superior$	$Ln, superior = Ln, inferior + TC$

Fonte: elaborado pela autora.

4.1.3 Seleção Final

A seleção final da amostra de cidades a serem estudadas foi feita de forma que abrangesse:

- Uma cidade em cada intervalo de latitude definido;
- Boa variabilidade de médias de radiação anual;
- As diferentes amplitudes de radiação média entre as épocas do ano;
- Expressiva diversidade de escala de temperaturas médias anuais; e
- Relevante variedade de escala de desvio padrão das temperaturas médias diárias ao longo do ano.

4.2 MODELAGEM DO EDIFÍCIO

A modelagem da geometria do pavimento foi realizada com base no desenho da planta baixa do pavimento em arquivo de extensão *.dxf (*Drawing Exchange Format*). Este arquivo foi convertido em arquivo de extensão *.idf (*Input Data File*) utilizando o programa computacional Importa DXF, na versão 3.5.1 (Westphal, 2014). Este software permite inserir demais informações de geometria, como o pé-direito e janelas (largura, altura e peitoril). Também possibilita inserir, previamente, as densidades de carga de pessoas, iluminação e equipamentos. Posteriormente houve conferência do modelo com base no arquivo *.dxf gerado na simulação. As demais configurações, ganhos internos, rotinas de uso, materiais construtivos e sistema de condicionamento de ar, foram realizadas diretamente no IDF Editor, interface do *software EnergyPlus*. As configurações foram definidas conforme apresentado a seguir.

4.2.1 Geometria

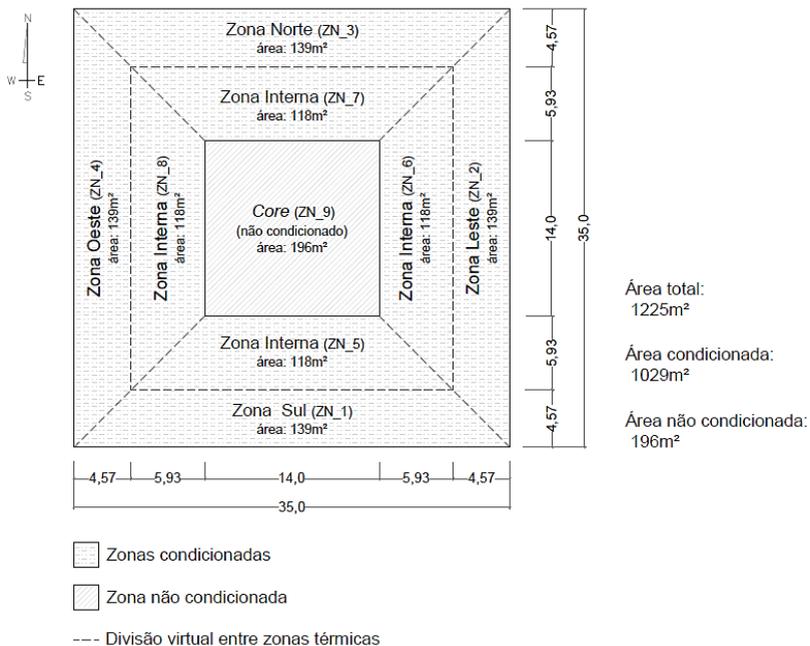
No estudo analisou-se um pavimento tipo de um edifício de escritórios hipotético, de planta aberta. A escolha da geometria do mesmo realizou-se a partir de definições relacionadas ao volume do modelo e à delimitação das zonas térmicas.

Para esta pesquisa foi utilizado como base o modelo de pavimento de escritórios de Lam e Hui (1995), o qual se caracteriza por sua planta quadrada com dimensões simplificadas. Este formato possibilita a análise homogênea dos efeitos das variações nas aberturas para cada uma das orientações solares.

O pavimento foi dividido em nove zonas térmicas: quatro zonas periféricas, quatro zonas internas e uma zona central (*core*). Exceto os limites do *core*, as divisões representadas são apenas partições virtuais, sem barreiras físicas, mantendo a configuração de planta aberta. Definiram-se as zonas periféricas limítrofes à parede externa com largura de 4,57 metros (ou 15 pés) de acordo com recomendações dos requisitos de modelagem para cálculo de desempenho de edificações, na ASHRAE Standard 90.1 (ASHRAE, 2007). Além de possibilitar análises relacionadas à orientação solar, esta distribuição permite a análise dos resultados nas áreas mais próximas às janelas, regiões que sofrem maior influência na variação nas aberturas.

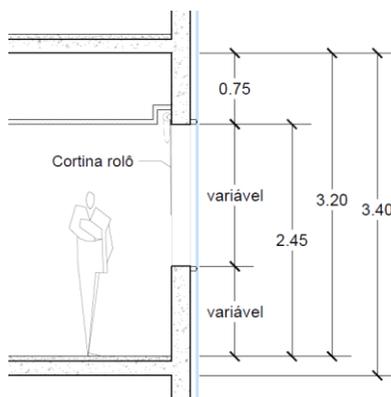
A Figura 36 apresenta uma planta esquemática do pavimento e suas dimensões. Também retrata o zoneamento térmico do pavimento indicando as zonas periféricas e internas condicionadas e o *core* não condicionado. Consideraram-se as linhas tracejadas como partições virtuais, sem paredes físicas entre as zonas térmicas. A Figura 37 expõe um corte esquemático da fachada do pavimento, no qual são indicadas as alturas fixas e variáveis.

Figura 36 – Planta esquemática do pavimento tipo, indicando o condicionamento de ar, dimensões e divisão das zonas térmicas (unidade: m). Linhas tracejadas representam partições virtuais.



Fonte: Baseado em Lam e Hui, 1995. Imagem elaborada pela autora.

Figura 37 - Corte esquemático do pavimento tipo.



Fonte: Baseado em Lam e Hui, 1995. Imagem elaborada pela autora.

4.2.2 Ganhos internos

A ocupação, a potência de iluminação e densidade de carga de equipamento foram definidas com base no anexo C, Fontes Internas de Calor e Umidade, da ABNT NBR 16.401-1:2008 (ABNT, 2008a).

Os valores de carga de equipamentos foram definidos conforme proposto na tabela C.6 para a função de escritórios. Esta tabela sugere quatro densidades de ocupação típicas de carga de equipamentos para diversos tipos de escritórios conforme tipo de carga: leve, média, média/alta e alta, como pode ser observado na Tabela 9. Considerou-se a densidade leve muito baixa, por tanto, para esta pesquisa, optaram-se por dois níveis de carga interna: alta e média. A carga de equipamentos foi estipulada em 21,5 W/m², para alta densidade de ocupação, e 10,6 W/m², para média. Para estas densidades de ocupação assumem-se que as áreas por posto de trabalho são de 7,7 m² e 11,6 m², respectivamente.

Tabela 9 - Densidade típica de carga de equipamentos para diversos tipos de escritórios

Densidade típica de carga de equipamentos para diversos tipos de escritórios		
Tipo de carga	Densidade W/m ²	Descrição do escritório Assumindo:
Leve	5,4	15,5 m ² por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 0,67, exceto 0,33 para impressoras
Média	10,7	11,6 m ² por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 0,75, exceto 0,50 para impressoras
Média/alta	16,2	9,3 m ² por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 0,75, exceto 0,50 para impressoras
Alta	21,5	7,7 m ² por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 1,0, exceto 0,50 para impressoras

Fonte: Tabela C.6, (ABNT, 2008a).

O item 6.2 da NBR 16.401-1 estabelece que o número de pessoas no recinto deve ser definido conforme estipulado pelo contratante do projeto ou conforme indicação da tabela 1 da ABNT NBR 16401-3:2008 (ABNT, 2008c). Nesta, a densidade de ocupação esperada para escritórios com alta densidade é de 20 pessoas a cada 100m², ou seja, 5 m²/pessoa, e com média densidade é de 14 pessoas a cada 100m² (aproximadamente 7m²/pessoa). Estes valores divergem da área prevista na tabela C.6 da ABNT NBR 16.401-1:2008, supracitada, para cada estação de trabalho. Para esta pesquisa optou-se por considerar a ocupação do pavimento de uma pessoa por posto de trabalho,

utilizando os valores de 7,7 m²/pessoa e 11,6 m²/pessoa como as densidades de ocupação dos modelos de simulação.

A potência de iluminação foi definida de acordo com a tabela C.2 que recomenda taxas típicas de dissipação de calor pela iluminação. Para escritórios e bancos sugere-se iluminação do tipo fluorescente com potência dissipada de 16 W/m². A norma não diferencia a potência de iluminação conforme ocupação.

A taxa metabólica de cada ocupante, definida pela atividade realizada individualmente, foi estabelecida de acordo com o anexo B da ISO 7730:2005 (ISO, 2005) que define as taxas metabólicas para diferentes atividades. Para atividades sedentárias de escritório, recomenda-se a taxa metabólica de 70 W/m². Este valor representa a “taxa típica de metabolismo por unidade de área de superfície corporal de um adulto” para esta atividade (ABNT, 2008b). A ABNT (2008b) cita a área de DuBois de 1,8m² de superfície corporal média para uma pessoa. Desta forma, este estudo considerará, durante todo tempo de ocupação, a taxa metabólica de 126 W/pessoa para todos ocupantes.

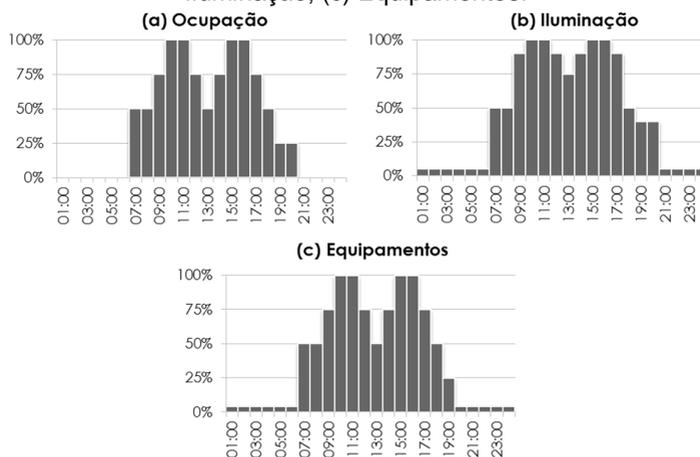
A Tabela 10 apresenta o resumo das densidades de carga interna utilizadas. Nota-se que, da alta para a média densidades de ocupação, a carga interna total varia em 30%. Havia a opção de baixa densidade de ocupação de acordo com a ABNT NBR 16.401-1:2008 (ABNT, 2008a), entretanto considerou-se que esta variação já é significativa para este estudo e condiz melhor com a realidade.

As rotinas de uso dos sistemas da edificação foram configuradas conforme Figura 38. A ocupação e a utilização dos sistemas são reduzidas entre 12 e 14 horas considerando o período de almoço. Não se considerou ocupação durante o fim de semana. Determinou-se 5% da iluminação e equipamentos em funcionamento constante em períodos sem ocupação. O acionamento da iluminação artificial foi configurado de forma estática, sem considerar a disponibilidade de iluminação natural.

Tabela 10 – Tabela resumo: densidade de ocupação.

Densidade	Ocupação (m ² /pessoa)	Equipamentos (W/m ²)	Iluminação (W/m ²)	Taxa Metabólica (W/pessoa)	Total (W/m ²)
Alta	7,7	21,5	16,0	126	53,9
Média	11,6	10,7	16,0	126	37,6

Figura 38 - Schedules para os dias de semana: (a) Ocupação; (b) Iluminação; (c) Equipamentos.



4.2.3 Materiais Construtivos

Com o intuito de isolar o efeito das modificações nas aberturas transparentes nos diferentes climas, optou-se por utilizar os mesmos materiais opacos de fechamento para todos os modelos simulados.

Considerando as variações climáticas entre as cidades, procurou-se um parâmetro de definição de materiais de envoltória. Elegeram-se os parâmetros de pré-requisitos da envoltória definidos no RTQ-C (INMETRO, 2013b) para os limites de transmitância (U) e absortância (α) das zonas bioclimáticas. Optou-se por esta referência pelo fato deste regulamento ser a base para etiquetagem de eficiência energética de edifícios comerciais no Brasil. Para definição dos materiais utilizados nesta pesquisa, buscaram-se composições que atendessem aos limites máximos para poder obter nível A em eficiência energética em

todas as zonas climáticas, atendendo, por tanto, a todos os climas brasileiros. Isto foi possível visto que todos os pré-requisitos estabelecem valores máximos, desta forma, obedecendo ao valor máximo mais restritivo, atende-se ao pré-requisito para todas as zonas bioclimáticas. A Tabela 11 apresenta os valores limites que atendem aos pré-requisitos de todas as zonas bioclimáticas brasileiras. O valor mínimo de capacidade térmica (CT - 80 kJ/m²K), que só é estipulado para as zonas 7 e 8, não foi atendido, pois optou-se por um fechamento leve, mais condizente com o tipo de construção definida como modelo.

Tabela 11 - Valores limites máximos para paredes externas, estabelecidos pelo RTQ-C.

	Transmitância [U]	Absortância [α]
Paredes Externas	1,0 W/m ² K	50%

Fonte: INMETRO, 2013b.

A Tabela 12 apresenta as especificações das composições selecionados. As paredes internas e externas são revestidas por pintura na cor branco gelo. No piso, considerou-se a cor mel. Para definir o valor de absortância utilizou-se o Anexo Geral V, do RAC (INMETRO, 2013a). As propriedades térmicas dos materiais que compõe os elementos construtivos foram estipuladas de acordo com a NBR 15.220-2:2005 (ABNT,2005a) e podem ser visualizadas na Tabela 13.

Tabela 12 - Elementos Construtivos

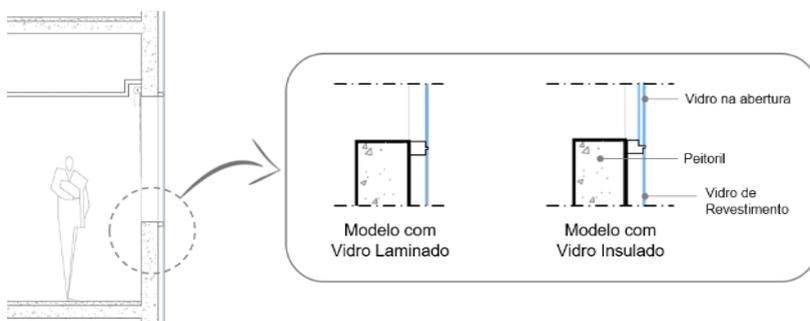
	Composição	Transmitância [U]	Absortâncias [α]
Paredes Externas	Placa de gesso (12,5mm) + Lã de Vidro (50mm) + Placa Cimentícia (10mm)	0,77 W/m ² K	Interna: α=0,297 Externa: α=0,297
Paredes Internas	Placa de Gesso (15mm) + Lã de Vidro (50mm) + Placa de Gesso (15mm)	0,69 W/m ² K	α =0,297
Forro	Placa de Gesso (15mm)	1,40 W/m ² K	α =0,297
Laje (Piso e Teto)	Reboco (25mm) + Laje Concreto (200mm) + Reboco (25mm) + Piso Cerâmico (7.5mm)	2,74 W/m ² K	Reboco: α=0,297 Piso: α=0,418

Tabela 13 – Propriedades térmicas dos materiais utilizados: densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c).

Material	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m.K)]	c [J/(kg.K)]
Placa de gesso	875	0,35	840
Placa Cimentícia	1800	0,95	840
Reboco	2000	1,15	1000
Laje Concreto	2200	1,75	1000
Piso Cerâmico	1600	0,90	920
Lã de Vidro	100	0,045	700

Estabeleceu-se que o modelo de edificação é completamente revestido de vidro. As composições de paredes externas de cada modelo consideram revestimento com o vidro laminado utilizado nas janelas, como pode ser observado na Figura 39. Esta configuração foi incluída nos modelos de simulação no *EnergyPlus* como um material de isolamento transparente utilizando um objeto de entrada chamado “*SurfaceControl: MovableInsulation*” que fornece isolamento à perda de calor sem diminuir drasticamente a transmitância de energia solar. Esta foi a forma de modelagem encontrada que melhor condiz com a realidade deste tipo de composição de paredes.

Figura 39 - Demonstração do revestimento de vidro nas paredes externas.



Fonte: Elaborado pela autora.

No modelo computacional, as divisões entre as zonas térmicas foram configuradas como divisórias virtuais. Estas divisórias foram modeladas no *EnergyPlus* como um material “*Infrared Transparent*”, o qual funciona como um elemento transparente que permite a transmissão da radiação visível e solar, porém não participa com trocas convectivas e condutoras entre as zonas que separa. Desta maneira, mantém-se a configuração de pavimento de escritórios de planta aberta ao mesmo tempo em que permite avaliar separadamente as áreas mais próximas às janelas. Para a delimitação do *core* utilizou-se a configuração de paredes internas.

Em todas aberturas utilizaram-se persianas translúcidas do tipo rolô com refletância solar média (50%) e baixa transmitância solar (10%). As cortinas foram configuradas com controle de sombreamento que é ativado quando a radiação solar incidente exceder ao *setpoint* definido em 250 W/m^2 , que seria aproximadamente a radiação horizontal incidente entre 9h e 15h. Considerou-se um pavimento intermediário, no décimo andar (30 metros de altura). Desta forma, a cobertura e o piso foram configurados como fechamentos adiabáticos, considerando que os pavimentos adjacentes possuem as mesmas condições térmicas.

4.2.4 Sistema de Condicionamento de Ar

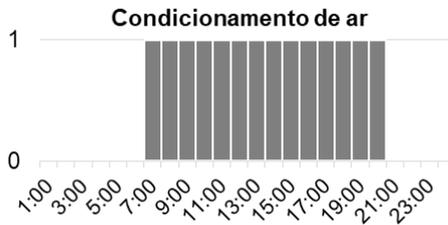
O pavimento é condicionado artificialmente com sistema de condicionamento de ar de expansão direta do tipo PTHP (*Packaged Terminal Heat Pump*), equivalente ao uso de aparelhos *splits*, com exceção do *core*, que não é climatizado. O sistema possui COP 3,0 W/W (*coefficient of performance*) e seu termostato foi configurado com *setpoint* de aquecimento em 20°C e de resfriamento em 24°C , conforme Tabela 14. Nesta configuração, o programa entende como existindo um sistema de condicionamento individual para cada zona térmica.

A Figura 40 apresenta a programação de funcionamento do sistema de condicionamento de ar nos dias de semana. O sistema deve operar das 7h até as 21h, com dimensionamento da capacidade variando conforme dados de simulação. Nos fins de semana a edificação foi considerada desocupada e, portanto, sem funcionamento do sistema de condicionamento.

Tabela 14 - Características do Sistema de Condicionamento de Ar

Tipo	PTHP (<i>Packaged Terminal Heat Pump</i>), equivalente a um aparelho Split.
COP	3,0 W/W
Setpoints	Aquecimento: 20°C Resfriamento: 24°C
Capacidade	Definida pelo auto dimensionamento do <i>EnergyPlus</i> .
Renovação de ar	0,0075 m ³ /s por pessoa
Taxa de infiltração	0,3 trocas de ar por hora

Figura 40 - Funcionamento do sistema de condicionamento de ar.
Sendo, 0: desligado e 1: ligado.



4.3 ESPECIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS VARIÁVEIS

Para analisar a influência do isolamento térmico gerado pela câmara de ar presente no vidro insulado, realizaram-se comparações entre vidros insulados - duplos com câmara de ar – e vidros laminados. Para cada cenário comparativo foram analisados dois modelos, um com cada tipo de vidro, com mesmo fator solar base e com mesmo WWR.

O vidro insulado é composto do vidro laminado base, ao qual foi comparado, com adição de câmara de ar e uma lâmina de vidro monolítico incolor. Desta forma, entende-se fator solar base como o fator solar do vidro laminado utilizado no cenário comparativo de vidro laminado e sua composição insulada. Optou-se por essa solução a fim de isolar os resultados do efeito do aumento na

resistência térmica do vidro insulado devido à câmara de ar. Foram testados quatro fatores solar base: 30%, 40%, 50% e 60%.

Os vidros laminados e composições insuladas foram especificados a partir de vidros reais encontrados no mercado brasileiro, com base em catálogos dos fabricantes CEBRACE e Guardian. As especificações totais das configurações de vidros insulados foram obtidas inserindo os dados de propriedades ópticas e térmicas dos vidros reais no *software* WINDOW 7.4 (LBNL, 2016), que permite calcular os dados equivalentes da composição. A Tabela 15 apresenta as propriedades ópticas e térmicas dos vidros utilizados neste estudo.

Observa-se que, ao introduzir a câmara e ar e um vidro monolítico à composição, o fator solar final da composição altera-se. Na seleção de vidros utilizada para esta pesquisa, o fator solar, comparando o vidro laminado e a composição insulada, variou entre 6% e 18%. Enfatiza-se que, por utilizar o mesmo vidro laminado tanto para a composição insulada quanto para a sua composição comparativa não insulada, o fator solar que referencia os modelos será uma classificação nominal e não o fator solar real das composições.

Além disso, variou-se também o percentual de abertura da fachada (WWR, *Window-to-Wall Ratio*), com o objetivo de analisar se o grau de influência da resistência térmica do vidro insulado varia conforme aumenta-se a área de janelas. Definiram-se quatro percentuais de abertura da fachada: 30%, 40%, 50% e 60%. Todas as fachadas do pavimento possuem o mesmo WWR. Considerou-se a abertura estendendo-se horizontalmente ao longo de toda a fachada, variando sua altura. A Figura 41 apresenta, de forma esquemática, as fachadas indicando as dimensões das janelas.

A Figura 42 apresenta um esquema com as combinações paramétricas estudadas. A combinação entre as variáveis resultou em um total de 288 modelos computacionais, 32 para cada cidade estudada. Em uma segunda etapa, as simulações de todos os modelos foram refeitas alterando a densidade de ocupação para média, com configurações descritas no item 4.2.2, totalizando, então, em 576 simulações.

Tabela 15 - Propriedades Ópticas e Térmicas dos Vidros

	LAMINADO	INSULADO			
		Externo	Interno	Composição	
FS _{base} 30%	Espessura (mm)	8,00	8,00	6,00	8,00 + 12,70 + 6,00
	Tsol	0,15	0,15	0,82	0,13
	Rsol1	0,29	0,29	0,07	0,29
	Rsol2	0,27	0,27	0,07	0,26
	Tvis	0,17	0,17	0,89	0,15
	Rvis1	0,34	0,34	0,08	0,34
	Rvis2	0,27	0,27	0,08	0,30
	Emis1	0,84	0,84	0,89	0,84
	Emis2	0,84	0,84	0,89	0,89
	Cond [W/m.K]	1,00	1,00	1,00	-
	Processo	Laminado	Laminado	Monolítico	Lam.+câm. ar+mon.
U [W/m²K]	5,63	5,63	5,70	2,75	
Fator Solar	0,28	0,28	0,84	0,23	
FS _{base} 40%	Espessura (mm)	8,00	8,00	6,00	8,00 + 12,70 + 6,00
	Tsol	0,27	0,27	0,82	0,22
	Rsol1	0,20	0,20	0,07	0,21
	Rsol2	0,15	0,15	0,07	0,17
	Tvis	0,33	0,33	0,89	0,30
	Rvis1	0,23	0,23	0,08	0,24
	Rvis2	0,17	0,17	0,08	0,22
	Emis1	0,84	0,84	0,89	0,84
	Emis2	0,84	0,84	0,89	0,89
	Cond [W/m.K]	1,00	1,00	1,00	-
	Processo	Laminado	Laminado	Monolítico	Lam.+câm. ar+mon.
U [W/m²K]	5,63	5,63	5,70	2,75	
Fator Solar	0,40	0,40	0,84	0,34	
FS _{base} 50%	Espessura (mm)	8,40	8,40	6,00	8,00 + 12,70 + 6,00
	Tsol	0,59	0,59	0,82	0,40
	Rsol1	0,18	0,18	0,07	0,20
	Rsol2	0,14	0,14	0,07	0,17
	Tvis	0,59	0,59	0,89	0,53
	Rvis1	0,12	0,12	0,08	0,15
	Rvis2	0,08	0,08	0,08	0,14
	Emis1	0,89	0,89	0,89	0,89
	Emis2	0,89	0,89	0,89	0,89
	Cond [W/m.K]	1,00	1,00	1,00	-
	Processo	Laminado	Laminado	Monolítico	Lam.+câm. ar+mon.
U [W/m²K]	5,60	5,60	5,70	2,79	
Fator Solar	0,52	0,52	0,84	0,49	
FS _{base} 60%	Espessura (mm)	8,00	8,00	6,00	8,00 + 12,70 + 6,00
	Tsol	0,48	0,48	0,82	0,40
	Rsol1	0,12	0,12	0,07	0,14
	Rsol2	0,09	0,09	0,07	0,13
	Tvis	0,56	0,56	0,89	0,50
	Rvis1	0,14	0,14	0,08	0,17
	Rvis2	0,10	0,10	0,08	0,16
	Emis1	0,84	0,84	0,89	0,84
	Emis2	0,84	0,84	0,89	0,89
	Cond [W/m.K]	1,00	1,00	1,00	-
	Processo	Laminado	Laminado	Monolítico	Lam.+câm. ar+mon.
U [W/m²K]	5,63	5,63	5,70	2,75	
Fator Solar	0,57	0,57	0,84	0,50	

Fonte: Fabricantes CEBRACE e Guardian.

Leia-se:

Tsol = Transmitância à radiação solar

Rsol1 = Refletância à radiação solar na face 1

Rsol2 = Refletância à radiação solar na face 2

Tvis = Transmitância à radiação solar no espectro visível

Rvis1 = Refletância à radiação visível na face 1

Rvis2 = Refletância à radiação visível na face 2

Emis1 = Emissividade em ondas longas na face 1

Emis2 = Emissividade em ondas longas na face 2

Cond = Condutividade térmica

U = Transmitância térmica

Figura 41 - Vistas esquemáticas das fachadas com variação do WWR.
Unidades: metros.

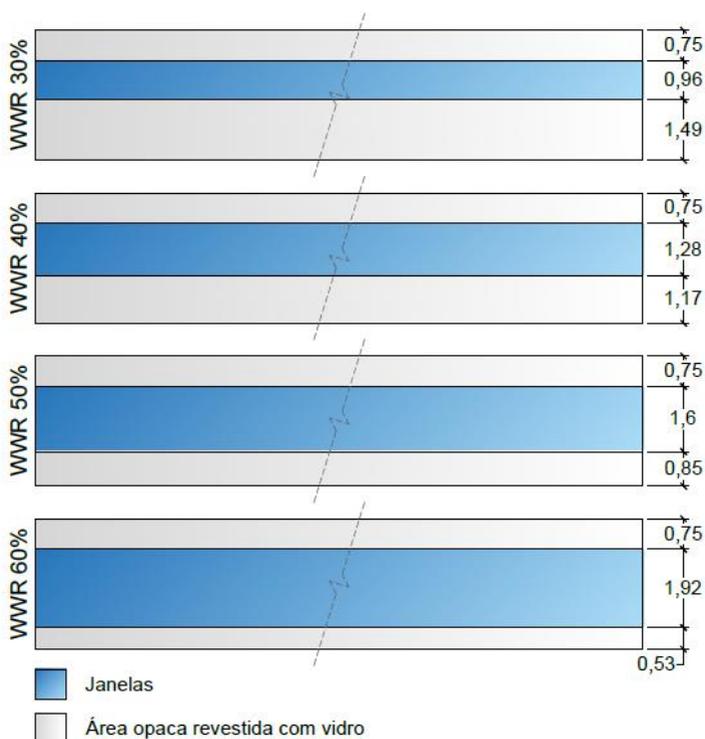
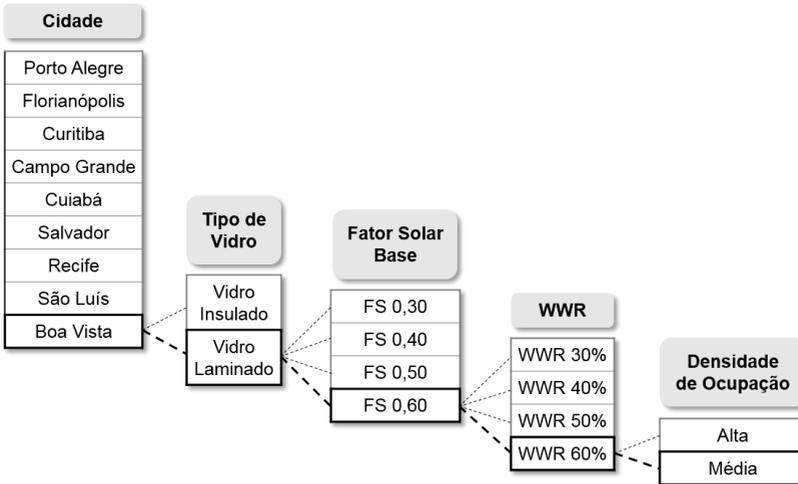


Figura 42 – Esquema de combinações paramétricas.



4.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO ENERGÉTICO

Realizaram-se as simulações computacionais de desempenho termoenergético por meio do programa computacional *EnergyPlus*, na versão 8.6.0, lançada em setembro de 2016. A Figura 43 apresenta o organograma das simulações computacionais de desempenho realizadas nesta pesquisa, descreve quais os dados de entrada necessários e quais os dados de saída solicitados para as análises de desempenho térmico.

As simulações foram realizadas simultaneamente por conjuntos de modelos utilizando a opção “*group of input files*” (grupo de arquivos de entrada) no *EP-Launch* do *EnergyPlus*. Cada bloco foi definido com 32 modelos, o qual representava uma cidade e uma densidade de ocupação. Por exemplo, simularam-se primeiramente os 32 modelos de Porto Alegre com alta densidade de ocupação.

A simulação computacional de desempenho energético de edificações realizada no *EnergyPlus* necessita de arquivos climáticos com extensão *.epw (*Energy Plus Weather File*) que caracterizam as condições climatológicas de um ano base para os

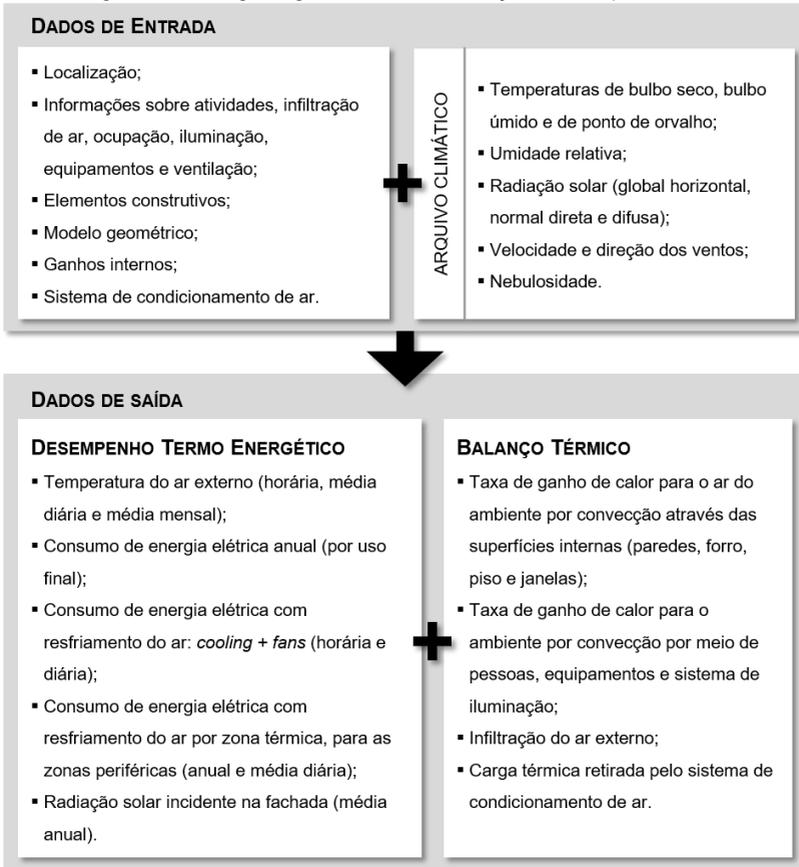
locais estudados, a partir de dados horários. Os arquivos utilizados nesta pesquisa foram obtidos na biblioteca de arquivos climáticos do próprio software *EnergyPlus*, disponível em seu site¹.

Existem vários tipos de arquivos climáticos disponíveis, os quais se diferem pelo método de obtenção do ano base. Scheller et al. (2015) realizaram um estudo comparativos entre três tipos de arquivos climáticos disponíveis para cidades brasileiras: *Test Reference Year* (TRY), *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA) e INMET (dados medidos nas estações automáticas do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia). Consideraram-se 15 cidades brasileiras: “Florianópolis, Porto Alegre, Curitiba, Santa Maria, Rio de Janeiro, São Paulo, Brasília, Belo Horizonte, Campo Grande, Cuiabá, Belém, São Luiz, Salvador, Recife e Natal”. As variáveis de irradiância destes arquivos foram comparadas aos dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2006) e do *Global Atlas* (IRENA, 2017). Concluiu-se que os arquivos SWERA apresentam menor diferença entre os dados de radiação comparado aos atlas referidos.

Desta forma, optou-se primeiramente por arquivos climáticos do tipo SWERA, desenvolvidos pelo projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment*. Esta escolha deve-se ao fato de que uma boa definição da radiação solar é um fator importante para a análise de desempenho de vidros.

¹ Os arquivos climáticos estão disponíveis em: https://energyplus.net/weather-region/south_america_wmo_region_3/BRA%20%20 Acesso em: 24/05/2016

Figura 43 - Organograma das Simulações Computacionais



4.5 ANÁLISE DE DESEMPENHO ENERGÉTICO

O desempenho térmico dos modelos foi avaliado por meio dos dados de consumo de energia elétrica obtidos nas simulações computacionais. Analisaram-se os consumos anuais de energia elétrica para condicionamento do ar, mais especificamente para resfriamento do ar. Este recorte foi feito considerando, conforme entendimento através de revisão de literatura, que este é o uso energético que sofre maior influência do tipo de vidro. São analisados:

4.5.1 Consumo de energia elétrica: vidro insulado x vidro laminado

Primeiramente, verificou-se a divergência percentual de consumo energético para resfriamento do ar entre os pares de modelos (mesmos FS_{base} e WWR) com vidro insulado e com vidro laminado. O objetivo desta análise é identificar em quais cidades o vidro insulado apresenta vantagem sobre o uso de vidros não-insulados e em quais cidades o uso desta configuração de vidros não apresenta benefícios.

4.5.2 Relação entre consumo energético e temperatura do ar externo

A fim de entender a relação do clima local com a utilização de vidros insulados, comparou-se a temperatura média diária do ar no exterior da edificação, com a diferença de consumo diário em condicionamento de ar entre os modelos com vidro insulado e vidro laminado de mesmos FS_{base} e WWR.

Para tanto, elegeram-se dois períodos de cinco semanas consecutivas, configurando um período representativo de verão e um de inverno. Optaram-se pelas cinco semanas que englobassem o mês central de cada estação, sendo assim, o período de verão foi definido entre os dias 27 de janeiro e 1º de março e o período de inverno entre 30 de julho e 2 de setembro. Entende-se que, devido à ampla distribuição geográfica do Brasil, principalmente latitudinal, há cidades onde não ocorre verão e inverno, mas sim estações de seca e de chuva. Entretanto, utilizou-se o padrão de estações do hemisfério sul como nomenclatura para caracterizar os períodos estudados. Optou-se por observar as mesmas datas para todas as cidades, com o intuito de avaliar principalmente a variação de incidência de radiação solar.

Selecionou-se um par de modelos (com mesmos FS e WWR, mas tipo de vidros distintos) de cada cidade para esta análise. Optou-se pelos pares que obtiveram a maior diferença no consumo energético com resfriamento do ar, comparando o vidro insulado e o vidro laminado.

4.5.3 Relações entre os parâmetros variáveis e o consumo energético

Com o intuito de analisar as implicações das relações entre os parâmetros variáveis (FS, WWR e o tipo de vidro) no consumo da edificação, compararam-se os consumos energéticos anual em condicionamento do ar dos modelos de cada cidade, para situação de alta densidade de ocupação e para média densidade.

4.5.4 Consumo energético por zona térmica

Para cada cidade e densidade de ocupação, observou-se a diferença percentual no consumo energético com resfriamento entre os modelos com vidro insulado e laminado, observando-se as zonas térmicas localizadas junto às fachadas. Esta análise tem como objetivo identificar possíveis disparidades no comportamento térmico de cada orientação solar.

4.5.5 Variação na densidade de ocupação

Com base nos resultados das análises anteriores, buscou-se verificar possíveis divergências entre o comportamento termo energético neste pavimento de escritório ao reduzir a densidade de ocupação de alta para média, conforme especificado na Tabela 10. Investigou-se a existência de alterações nos perfis de consumo entre os modelos.

4.6 ANÁLISE DE BALANÇO TÉRMICO

O balanço térmico da edificação possibilita observar e entender como ocorrem os fluxos de calor entre os elementos construtivos e de funcionamento do edifício com o ar em seu interior, associado às influências do meio externo. As trocas entre o clima externo e interno ocorrem através dos componentes da envoltória (paredes, piso, cobertura e janelas) e pela infiltração de ar. Junto a estas trocas, adiciona-se o calor gerado pelas condições de uso e ocupação, advindo das pessoas, dos equipamentos e do sistema de iluminação. O sistema de condicionamento de ar participa desta equação retirando ou

adicionando calor do ar no interior do ambiente para manter a temperatura definida pelo termostato.

Como pôde ser observado nos capítulos anteriores, a simulação computacional de desempenho termo energético operando o *software EnergyPlus* permite analisar o balanço térmico da edificação como um todo ou, mais detalhadamente, de cada ambiente (zona térmica). Por meio deste estudo é possível compreender através de quais elementos há maior ganho de calor e em quais há possibilidade de perda de calor, para um determinado tipo de edificação e clima. Nesta pesquisa, a análise de balanço tem como objetivo investigar em que situações o vidro do tipo insulado auxilia positivamente no isolamento da edificação em relação ao clima externo e quando este isolamento se torna negativo por não permitir a dissipação do calor gerado internamente.

Realizaram-se as análises de balanço térmico para as quatro zonas térmicas que possuem contato com o meio externo, cada uma delas representadas pela sua orientação solar. Por meio das simulações obtiveram-se dados horários de fluxo de calor por convecção das superfícies internas (paredes, forro, piso e janelas), dos ganhos internos (pessoas, equipamentos e sistema de iluminação) e da infiltração de ar externo em relação ao ar no interior da zona térmica. Adicionou-se a esta verificação a capacidade térmica solicitada pelo sistema de condicionamento de ar para manter o ambiente nas temperaturas limite definidas (24°C para resfriamento e 20°C para aquecimento). A Tabela 16 relaciona as fontes do balanço térmico aos dados de saída solicitados na simulação computacional.

Tabela 16 - Relação entre elemento representado no balanço térmico e o dado de saída requisitado na simulação computacional

Elemento	Dados de saída requisitados
Paredes; Forro; Piso; Janelas.	<i>Zone, Average, Surface Inside Face Convection Heat Gain Rate [W]</i>
Ganhos internos (pessoas, equipamentos e iluminação)	<i>HVAC, Average, Zone Air Heat Balance Internal Convective Heat Gain Rate [W]</i>
Infiltração	<i>HVAC, Average, Zone Air Heat Balance Outdoor Air Transfer Rate [W]</i>
Sistema de condicionamento de ar	<i>HVAC, Average, Zone Air Heat Balance System Air Transfer Rate [W]</i>

Elegeram-se duas cidades para este estudo. Buscaram-se as cidades com as relações de temperatura e radiação solar médias anuais mais baixas e mais altas dentre o grupo de cidades selecionadas na pesquisa. Dentre os modelos simulados para cada uma das cidades, optou-se pelos mesmos modelos da análise de relação diária entre consumo energético e temperatura externa (item 4.5.2).

O balanço térmico é apresentado de duas formas. A primeira análise soma os ganhos e perdas de calor de uma semana de verão e uma de inverno, observando o efeito dos fluxos de calor em um ciclo com dois dias da edificação sem uso e cinco dias com ocupação. A segunda avalia os fluxos de calor na zona térmica para um dia de verão e um dia de inverno, observando os dados horários. Relacionam-se as trocas térmicas às temperaturas do ar externo e às temperaturas do ar no ambiente.

Os períodos de análise foram definidos com base nos dias representativos de inverno e de verão estabelecidos no item 4.5.2. Optou-se pela semana intermediária de cada período. O dia representativo foi definido como a quarta-feira da semana de cada estação, por ser o dia central. As datas escolhidas podem ser observadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Semana e dia representativos selecionados: verão e inverno.

	Semana	Dia
Verão	11 a 17/fevereiro	14/fevereiro
Inverno	12 a 18/agosto	15/agosto

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo apresenta os resultados provenientes da aplicação dos procedimentos descritos no capítulo anterior. Fracionado em dois itens principais, inicialmente descreve-se todos os passos para a seleção das cidades representativas dos diferentes climas brasileiros em relação aos dois principais fatores climáticos que influenciam no desempenho dos vidros em edificações: radiação solar e temperatura do ar. Estabelecidas as cidades, definiram-se os arquivos climáticos a serem utilizados nas simulações computacionais.

O segundo item principal apresenta análise dos resultados obtidos por meio das simulações computacionais. Os resultados e análises observaram o consumo anual de energia elétrica para resfriamento, a variação do consumo energético para resfriamento por zona térmica, a relação diária entre consumo energético e temperatura externa e a comparação entre os resultados para as diferentes densidades de ocupação.

5.1 SELEÇÃO DOS CLIMAS E ARQUIVOS CLIMÁTICOS

Conforme descrito no item 0, para a definição dos climas a serem estudados foram determinados agrupamentos das capitais brasileiras conforme latitude, existência ou não de arquivo climático da cidade, radiação solar global horizontal e temperatura do ar externo ao longo do ano.

Primeiramente fragmentou-se o território brasileiro a cada 5° de latitude, sendo de -35° a +5°, e se distribuíram as cidades nestas faixas de latitude. Esta seleção resultou em 27 cidades divididas em 8 grupos. Dentre estas cidades, verificou-se que, até a data em que esta seleção foi realizada, apenas Goiânia (GO) não possui nenhum tipo de arquivo climático e, por conseguinte, foi excluída da seleção. A Tabela 18 demonstra o resultado deste processo.

5.1.1 Radiação Solar Global Horizontal

Analisando o mapa Radiação Solar Horizontal Média (PEREIRA et al., 2006), obtiveram-se as médias anuais de radiação solar e as médias sazonais (trimestrais) de radiação solar. Os valores registados foram classificados de acordo com a escala de radiação solar global horizontal (em kWh/m²) e o grau de variação anual de cada cidade expresso na Tabela 19.

Tabela 18 - Agrupamento das cidades por latitude e existência de arquivo climático.

UF	Cidade	Latitude	Possui Arquivo Climático?	Tipo De Arquivo Climático
RS	Porto Alegre	-30,03	sim	TRY
SC	Florianópolis	-27,59	sim	TRY/SWERA
PR	Curitiba	-25,42	sim	TRY/SWERA
SP	São Paulo	-23,54	sim	TRY/SWERA
RJ	Rio de Janeiro	-22,9	sim	TRY/SWERA
MS	Campo Grande	-20,44	sim	SWERA
ES	Vitória	-20,32	sim	TRY
MG	Belo Horizonte	-19,92	sim	SWERA
GO	Goiânia	-16,67	não	-
DF	Brasília	-15,77	sim	TRY/SWERA
MT	Cuiabá	-15,59	sim	SWERA
BA	Salvador	-12,97	sim	TRY/SWERA
SE	Aracaju	-10,91	sim	TMY
TO	Palmas	-10,21	sim	TMY
AL	Maceió	-9,66	sim	TRY
AC	Rio Branco	-9,97	sim	TMY
RO	Porto Velho	-8,76	sim	SWERA
PE	Recife	-8,05	sim	TRY/SWERA
PB	João Pessoa	-7,11	sim	TMY
RN	Natal	-5,79	sim	TRY
PI	Teresina	-5,09	sim	TMY
CE	Fortaleza	-3,72	sim	TRY/SWERA
AM	Manaus	-3,1	sim	SWERA
MA	São Luís	-2,52	sim	TRY
PA	Belém	-1,45	sim	TRY/SWERA
AP	Macapá	-0,04	sim	TMY
RR	Boa Vista	2,82	sim	SWERA/TMY

Tabela 19 - Escala de Radiação Solar

Escala De Radiação Solar	
Nível de Radiação	Intervalo de Radiação [kWh/m ²]
1	0 - 3,15
2	3,15 - 3,50
3	3,50 - 3,85
4	3,85 - 4,20
5	4,20 - 4,55
6	4,55 - 4,90
7	4,90 - 5,25
8	5,25 - 5,60
9	5,60 - 5,95
10	5,95 - 6,30
11	6,30 - 6,65
12	Maior que 6,65

Fonte: Adaptado de PEREIRA et al. (2006).

As radiações médias foram registradas conforme apresentado na Tabela 19. Nesta tabela são apresentadas as médias de radiação global horizontal anual e sazonais, bem como o grau de variação de radiação média entre as estações, ainda agrupadas por intervalo de latitude.

A radiação média anual no Brasil se mantém entre 4,20 kWh/m² e 5,95 kWh/m², observando tendência de as médias serem menores nas latitudes mais distantes de zero. O intervalo de maior ocorrência foi entre 5,25 e 5,60 kWh/m², abrangendo 55,6% das capitais.

Ao observar as radiações médias sazonais, nota-se que as cidades mais ao sul tendem a apresentar maior grau de variação entre as estações do ano. Porto Alegre e Florianópolis possuem as maiores flutuações na radiação, sendo que Porto Alegre apresenta, simultaneamente, a menor média de radiação sazonal (nível 1, entre junho e agosto) e a maior (nível 11, entre dezembro e fevereiro), comparada às demais capitais, tendo como base os níveis de radiação apresentados na Tabela 19. Fortaleza, Belém e Boa Vista apresentam a menor variação ao longo do ano.

Tabela 20 - Radiações Médias Anuais e Sazonais da Capitais Brasileiras.

Cidade	Latitude	Rad. Média Anual [kWh/M²]	Radiação Média Sazonal [kWh/M²]				Grau de Variação
			Dez-Fev	Mar-Mai	Jun-Ago	Set-Nov	
Porto Alegre	-30,03	4,55 - 4,90	6,30 - 6,68	3,85 - 4,20	0 - 3,15	5,25 - 5,60	10
Florianópolis	-27,59	4,20 - 4,55	5,60 - 5,95	3,85 - 4,20	0 - 3,15	4,55 - 4,90	8
Curitiba	-25,42	4,55 - 4,90	5,60 - 5,95	3,85 - 4,20	3,15 - 3,50	4,90 - 5,25	7
São Paulo	-23,54	4,55 - 4,90	5,60 - 5,95	4,20 - 4,55	3,50 - 3,85	5,25 - 5,60	6
Rio de Janeiro	-22,9	4,90 - 5,25	5,95 - 6,30	4,20 - 4,55	3,50 - 3,85	4,90 - 5,25	7
Campo Grande	-20,44	5,25 - 5,60	5,95 - 6,30	4,55 - 4,90	4,20 - 4,55	5,95 - 6,30	5
Vitória	-20,32	4,90 - 5,25	5,95 - 6,30	4,20 - 4,55	3,85 - 4,20	4,90 - 5,25	6
Belo Horizonte	-19,92	5,25 - 5,60	5,95 - 6,30	4,55 - 4,90	4,55 - 4,90	5,60 - 5,95	4
Brasília	-15,77	5,25 - 5,60	5,60 - 5,95	4,90 - 5,25	4,55 - 4,90	5,95 - 6,30	4
Cuiabá	-15,59	5,25 - 5,60	5,60 - 5,95	4,55 - 4,90	4,55 - 4,90	5,60 - 5,95	3
Salvador	-12,97	4,90 - 5,25	5,95 - 6,30	4,55 - 4,90	3,85 - 4,20	5,25 - 5,60	6
Aracaju	-10,91	5,25 - 5,60	5,95 - 6,30	4,55 - 4,90	4,20 - 4,55	5,25 - 5,60	5
Palmas	-10,21	5,25 - 5,60	5,60 - 5,95	4,90 - 5,25	4,90 - 5,25	5,95 - 6,30	3
Maceió	-9,66	5,25 - 5,60	5,95 - 6,30	4,55 - 4,90	4,20 - 4,55	5,25 - 5,60	5
Rio Branco	-9,97	4,55 - 4,90	5,60 - 5,95	4,20 - 4,55	4,55 - 4,90	5,60 - 5,95	4
Porto Velho	-8,76	4,55 - 4,90	5,25 - 5,60	4,55 - 4,90	4,55 - 4,90	5,60 - 5,95	3
Recife	-8,05	4,90 - 5,25	5,60 - 5,95	4,55 - 4,90	3,85 - 4,20	5,25 - 5,60	5
João Pessoa	-7,11	5,25 - 5,60	5,60 - 5,95	4,55 - 4,90	4,20 - 4,55	5,25 - 5,60	4
Natal	-5,79	5,25 - 5,60	5,60 - 5,95	4,90 - 5,25	4,20 - 4,55	5,25 - 5,60	4
Teresina	-5,09	5,60 - 5,95	5,60 - 5,95	4,90 - 5,25	4,90 - 5,25	5,95 - 6,30	3
Fortaleza	-3,72	5,25 - 5,60	5,60 - 5,95	4,90 - 5,25	4,90 - 5,25	5,25 - 5,60	2
Manaus	-3,1	5,25 - 5,60	5,25 - 5,60	4,20 - 4,55	4,90 - 5,25	5,60 - 5,95	4
São Luís	-2,52	5,25 - 5,60	5,25 - 5,60	4,55 - 4,90	5,25 - 5,60	5,60 - 5,95	3
Belém	-1,45	5,25 - 5,60	5,25 - 5,60	4,55 - 4,90	5,25 - 5,60	5,25 - 5,60	2
Macapá	-0,04	5,25 - 5,60	5,25 - 5,60	4,55 - 4,90	5,25 - 5,60	5,60 - 5,95	3
Boa Vista	2,82	5,25 - 5,60	5,25 - 5,60	4,90 - 5,25	4,90 - 5,25	5,60 - 5,95	2

5.1.2 Temperatura Externa do Ar

As temperaturas médias do ar externo foram obtidas nos arquivos climáticos de cada cidade, priorizando os arquivos do tipo SWERA. Exceto para Boa Vista, a qual foram utilizadas as temperaturas obtidas no arquivo do tipo TMY (*Typical Meteorological Year*), visto que seu arquivo climático do tipo SWERA apresenta incoerências na temperatura externa do ar, como valores de zero grau Celsius na manhã do dia 30 de junho. Esta situação é melhor explicada posteriormente, no item 5.1.4, o qual aborda a escolha dos arquivos climáticos.

Observaram-se as temperaturas médias anuais e os desvios padrão das temperaturas médias diárias ao longo do ano. Para os dois casos, os valores foram distribuídos em classes estatísticas.

5.1.2.1 Definição das classes de temperaturas médias anuais

Os valores de temperatura média anual foram classificados conforme escalas obtidas pelo método de classes estatísticas apresentado no item 4.1.2.

Utilizando a equação (12), obteve valor de K igual a seis, conforme cálculos abaixo.

Sendo, $n = 26$ cidades:

$$K = 1 + 3,33 \log n \quad (12)$$

$$K = 1 + 3,33 \log 26$$

$$K = 5,71$$

$$K \approx 6$$

O campo de variação é a diferença entre o maior e o menor valores encontrados na amostra, neste caso, será a diferença entre a temperatura média de Curitiba e a de Teresina.

$$CV = 17,19^\circ\text{C} - 27,68^\circ\text{C}$$

$$CV = 10,49$$

O tamanho de cada classe é delimitado conforme equação (13).

$$TC = \frac{CV}{K} \quad (13)$$

$$TC = \frac{10,49}{6}$$

$$TC = 1,75$$

$$TC \approx 1,8$$

Por fim, o limite inferior do primeiro intervalo foi fixado de acordo com a equação (14), arredondando o resultado para um número inferior. Sendo x_i o menor valor da amostra, neste caso a temperatura média de Curitiba, $x_i = 17,19^\circ\text{C}$.

$$L_i = x_i - \frac{(K \times TC) - CV}{2} \quad (14)$$

$$L_i = 17,19 - \frac{(6 \times 1,8) - 10,49}{2}$$

$$L_i = 17,04$$

$$L_i \approx 17$$

Desta forma, definiram-se as classes conforme Tabela 21.

Tabela 21 - Escala de Temperaturas Médias Anuais

Classe	Intervalo
1	17,0°C - 18,8°C
2	18,8°C - 20,6°C
3	20,6°C - 22,4°C
4	22,4°C - 24,2°C
5	24,2°C - 26,0°C
6	26,0°C - 27,8°C

5.1.2.2 Definição das classes de desvios padrão das temperaturas médias diárias

O valor de K para a obtenção de classes estatísticas dos desvios padrão das temperaturas médias diárias será o mesmo da temperatura média anual, visto que n permanece sendo o número de capitais brasileiras. Sendo assim:

$$K \approx 6$$

O campo de variação será a diferença entre o desvio padrão de Porto Alegre e o de Fortaleza.

$$CV = 4,62 - 0,78$$

$$CV = 3,84$$

O tamanho de cada classe é delimitado conforme equação (13).

$$TC = \frac{CV}{K} \quad (13)$$

$$TC = \frac{3,84}{6}$$

$$TC = 0,64$$

$$TC \approx 0,7$$

Por fim, o limite inferior do primeiro intervalo foi fixado de acordo com a equação (14), arredondando o resultado para um número inferior. Sendo x_i o menor valor da amostra, neste caso o desvio padrão de Fortaleza, $x_i = 0,78$.

$$L_i = x_i - \frac{(K \times TC) - CV}{2} \quad (14)$$

$$L_i = 0,78 - \frac{(6 \times 0,7) - 3,84}{2}$$

$$L_i = 0,60$$

Desta forma, definiram-se as classes conforme Tabela 22.

Tabela 22 - Escala de Desvio Padrão de Temperaturas Médias Diárias

Classe	Intervalo
1	0,6 - 1,3
2	1,3 - 2,0
3	2,0 - 2,7
4	2,7 - 3,4
5	3,4 - 4,1
6	4,1 - 4,8

5.1.2.3 Temperaturas Médias Anuais e Desvio Padrão das Temperaturas Médias Diárias

A temperatura média anual de cada cidade foi obtida utilizando média aritmética entre os valores horários de temperatura externa presentes nos arquivos climáticos. Os desvios padrão das temperaturas médias diárias ao longo do ano foram obtidos conforme equação (11). A Tabela 23 apresenta estes dois dados classificados conforme escala de cores definidas nas Tabela 21 e Tabela 22.

Tabela 23 - Temperaturas Médias Anuais das Capitais Brasileiras

Cidade	Latitude	Temperatura externa do ar	
		Média Anual [°C]	Desvio Padrão (T média diária)
Porto Alegre	-30,03	19,26	4,62
Florianópolis	-27,59	20,75	3,66
Curitiba	-25,42	17,19	3,09
São Paulo	-23,54	19,55	3,53
Rio de Janeiro	-22,9	23,98	2,54
Campo Grande	-20,44	24,04	3,07
Vitória	-20,32	23,22	2,54
Belo Horizonte	-19,92	22,03	2,57
Brasília	-15,77	21,28	1,98
Cuiabá	-15,59	26,73	3,09
Salvador	-12,97	25,96	1,63
Aracaju	-10,91	26,54	1,29
Palmas	-10,21	26,81	1,64
Maceió	-9,66	24,25	1,46
Rio Branco	-9,97	25,11	1,95
Porto Velho	-8,76	26,31	1,33
Recife	-8,05	27,15	1,33
João Pessoa	-7,11	26,02	1,31
Natal	-5,79	25,70	1,24
Teresina	-5,09	27,68	1,36
Fortaleza	-3,72	27,24	0,78
Manaus	-3,1	26,79	1,54
São Luís	-2,52	26,74	0,83
Belém	-1,45	26,46	0,79
Macapá	-0,04	25,77	1,15
Boa Vista	2,82	27,02	1,46

Observa-se que a temperatura média anual tende a ser maior nas cidades de latitudes mais próximas a zero, concordando com a tendência de incidência de radiação solar demonstrada anteriormente. A Figura 44 e a Figura 45 apresentam os histogramas de frequências de ocorrência de cada classe de temperaturas médias anuais e de desvios padrão da temperatura média diária, respectivamente. Estes percentuais demonstram grande variação dos climas brasileiros, entretanto, nota-se predominância de temperatura médias mais altas (entre 24,2 e 27,8°C em 65% das cidades) e pouca oscilação nas temperaturas médias diárias ao longo do ano (desvio padrão entre 0,6 e 2,0 em 65% das capitais).

Figura 44 – Histograma de frequência de ocorrência de intervalos de temperaturas médias anuais: capitais brasileiras.

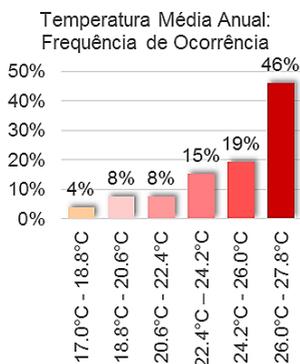
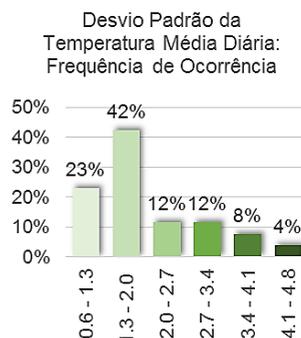


Figura 45 - Histograma de frequência de ocorrência de intervalo desvio padrão de temperaturas médias diárias: capitais brasileiras.



5.1.3 Seleção Final

A partir dos dados obtidos realizou-se a seleção de cidades a serem estudadas conforme item 4.1.3. O primeiro critério considerado foi de que houvesse pelo menos uma cidade em cada intervalo de latitude.

Procurou-se que o conjunto de cidades eleitas abrangesse os diferentes graus de radiação global horizontal média entre as

estações, classes de radiação solar horizontal média, classes de temperatura média anual e classes de desvio padrão de temperatura média diária encontradas. As cidades escolhidas podem ser observadas na Tabela 24. Para as latitudes entre -30° e -25° , optou-se por analisar os resultados tanto para Florianópolis quanto para Curitiba. Florianópolis foi selecionada por ser a única cidade com variação de radiação sazonal nível 8 e Curitiba por possuir a temperatura média anual mais baixa do país.

Tabela 24 - Cidades selecionadas e critérios de escolha

ZB	UF	Cidade	Latitude	Radiação Média Anual (kWh/m ²)	Variação Radiação Média Sazonal (kWh/m ²)	Temperaturas Do Ar	
						Média Anual	Desvio Padrão (\bar{T} diária)
3	RS	Porto Alegre	-30,03	4,55 - 4,90	10	19,26	4,62
3	SC	Florianópolis	-27,59	4,20 - 4,55	8	20,75	3,66
1	PR	Curitiba	-25,42	4,55 - 4,90	7	17,19	3,09
6	MS	Campo Grande	-20,44	5,25 - 5,60	5	24,04	3,07
7	MT	Cuiabá	-15,59	5,25 - 5,60	3	26,73	3,09
8	BA	Salvador	-12,97	4,90 - 5,25	6	25,96	1,63
8	PE	Recife	-8,05	4,90 - 5,25	5	27,15	1,33
8	MA	São Luís	-2,52	5,25 - 5,60	3	26,74	0,83
8	RR	Boa Vista	2,82	5,25 - 5,60	2	27,02	1,46

Acrescentou-se à tabela a informação de classificação no zoneamento bioclimático brasileiro (ZB) das cidades eleitas a fim de traçar um paralelo com a seleção realizada. Algumas considerações podem ser feitas:

a) Porto Alegre e Florianópolis encontram-se na mesma classificação climática, entretanto, apesar da proximidade nos valores de temperaturas do ar e radiação solar médias anuais, a oscilação destas variáveis ao longo do ano é significativamente maior em Porto Alegre.

b) O zoneamento bioclimático brasileiro considera que Salvador, Recife, São Luís e Boa Vista estão na mesma zona, entretanto Salvador e Recife apresentam variação na radiação solar média incidente significativa, ao passo que em São Luís e Boa Vista mantém-se mais constante.

Ao deter-se em dados de temperatura do ar externo e na umidade relativa do ar, o zoneamento proposto pela ABNT NBR 15.220:3 (ABNT, 2005b) desconsidera uma variável importante no estudo relacionado ao desempenho térmico de edificações de escritórios, a incidência de radiação solar.

Atentou-se para que o percentual de ocorrência dos critérios no conjunto de cidades selecionadas fosse o mais próximo possível das porcentagens de ocorrência para o total das capitais. A Figura 46, a Figura 47 e a Figura 48 apresentam os percentuais de ocorrência das classes de critérios de radiação global média anual, temperatura média anual e desvio padrão da temperatura média diária, respectivamente, entre as capitais comparado ao percentual obtido nas cidades selecionadas.

Por fim, na Figura 49 pode se visualizar o mapa brasileiro com a localização das cidades estudadas nesta pesquisa.

Figura 46 – Comparação do percentual de ocorrência da radiação global horizontal média anual: capitais e cidades selecionadas.

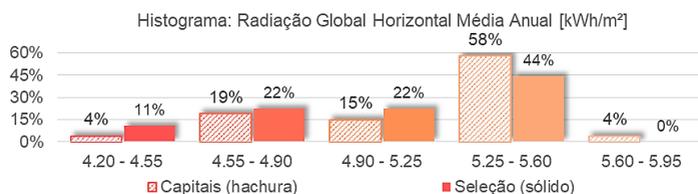


Figura 47 – Comparação do percentual de ocorrência da temperatura média anual: capitais e cidades selecionadas.

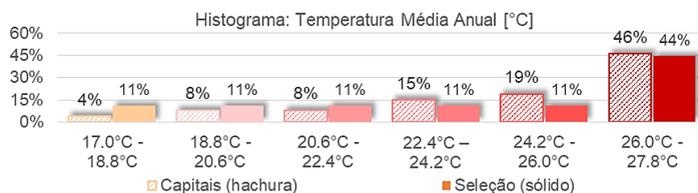


Figura 48 – Comparação do percentual de ocorrência do desvio padrão de temperaturas médias diárias: capitais e cidades selecionadas.

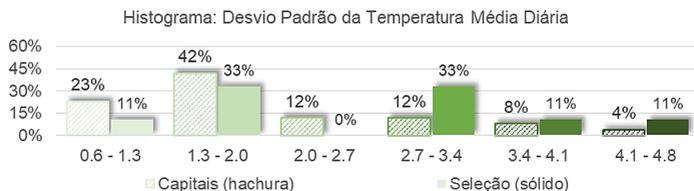


Figura 49 –Localização das cidades estudadas no mapa do Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.4 Arquivos Climáticos

A partir da seleção das cidades estudadas, definiram-se os arquivos climáticos utilizados nas simulações computacionais conforme descrito no item 4.4.

As cidades de Porto Alegre (RS) e São Luís (MA) não possuem arquivos climáticos do tipo SWERA, portanto foram utilizados arquivos do tipo TRY.

Ao analisar as informações do arquivo climático SWERA de Boa Vista (RR), notaram-se dados incoerentes, principalmente no mês de junho. Neste mês a temperatura mínima descrita é de 0°C, no dia 30, entre as 8h e as 13h, enquanto a temperatura média do restante do dia é de 24,6°C. Esta incongruência também fica evidente ao se observar o desvio padrão das temperaturas mínimas, o qual é de 4,5 para junho ao passo que nos demais meses está entre 0,7 e 1,3. Visto isso, optou-se por um arquivo

climático do tipo TMY elaborado por Maurício Roriz, revisado em 2015, com base nos dados horários de estações climatológicas do INMET (SHELLER et al., 2015). Este também está disponível na biblioteca de arquivos climáticos do EnergyPlus.

A Tabela 25 apresenta os arquivos climáticos utilizados nesta pesquisa.

Tabela 25 - Arquivos Climáticos

Cidade	Arquivo Climático	Tipo
Porto Alegre (RS)	BRA_RS_Porto.Alegre-Filho.Intl.AP.839710_TRY.1954.epw	TRY
Florianópolis (SC)	BRA_Florianopolis.838990_SWERA.epw	SWERA
Curitiba (PR)	BRA_Curitiba-Afonso.Pen.838400_SWERA.epw	SWERA
Campo Grande (MS)	BRA_Campo.Grande.836120_SWERA.epw	SWERA
Cuiabá (MT)	BRA_Cuiaba-Marechal.Ron.833620_SWERA.epw	SWERA
Salvador (BA)	BRA_Salvador.832290_SWERA.epw	SWERA
Recife (PE)	BRA_Recife-Guararapes.828990_SWERA.epw	SWERA
São Luís (MA)	BRA_MA_Sao.Luis-Machado.Intl.AP.822810_TRY.1966.epw	TRY
Boa Vista (RR)	BRA_RR_Boa.Vista.816150_INMET.epw	TMY

5.2 DESEMPENHO ENERGÉTICO

Por meio das simulações de desempenho energético dos modelos desenvolvidos, obtiveram-se estimativas de consumo energético com condicionamento de ar, mais especificamente, resfriamento do ar. Realizaram-se cinco análises principais referentes ao desempenho térmico:

- a) Comparou-se o consumo energético entre os modelos com vidro insulado e modelos com vidro laminado;
- b) Relacionou-se o consumo energético diário com condicionamento do ar à temperatura do ar externo;
- c) Analisou-se a relação entre a variação no FS, no WWR e no tipo de vidro com o consumo energético;
- d) Investigou-se a variação no consumo energético para resfriamento do ar conforme orientação solar da zona térmica; e
- e) Verificaram-se os efeitos da variação na densidade de ocupação.

5.2.1 Consumo de energia elétrica: vidro insulado x vidro laminado

Primeiramente comparou-se a diferença percentual de consumo energético para resfriamento do ar dos modelos com vidro insulado e com vidro laminado de mesmo FS e WWR. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e a Figura 51 apresentam as diferenças percentuais de consumo energético com resfriamento do ar entre modelos com vidro insulado e com vidro laminado, para as situações com alta e média densidade de ocupação, respectivamente. O percentual é positivo quando o modelo com vidro insulado apresenta maior consumo em relação ao modelo com vidro laminado. De maneira oposta, o percentual é negativo quando o consumo do modelo com vidro insulado for menor. Definiu-se uma faixa de +2% a -2% (que corresponderia a uma semana de consumo energético da edificação) na qual se considerou que os modelos obtiveram diferenças irrelevantes, ou seja, consumos equivalentes.

Figura 50 - Diferença percentual de consumo para resfriamento entre modelos com vidro insulado e modelos com vidro laminado: alta densidade de ocupação.

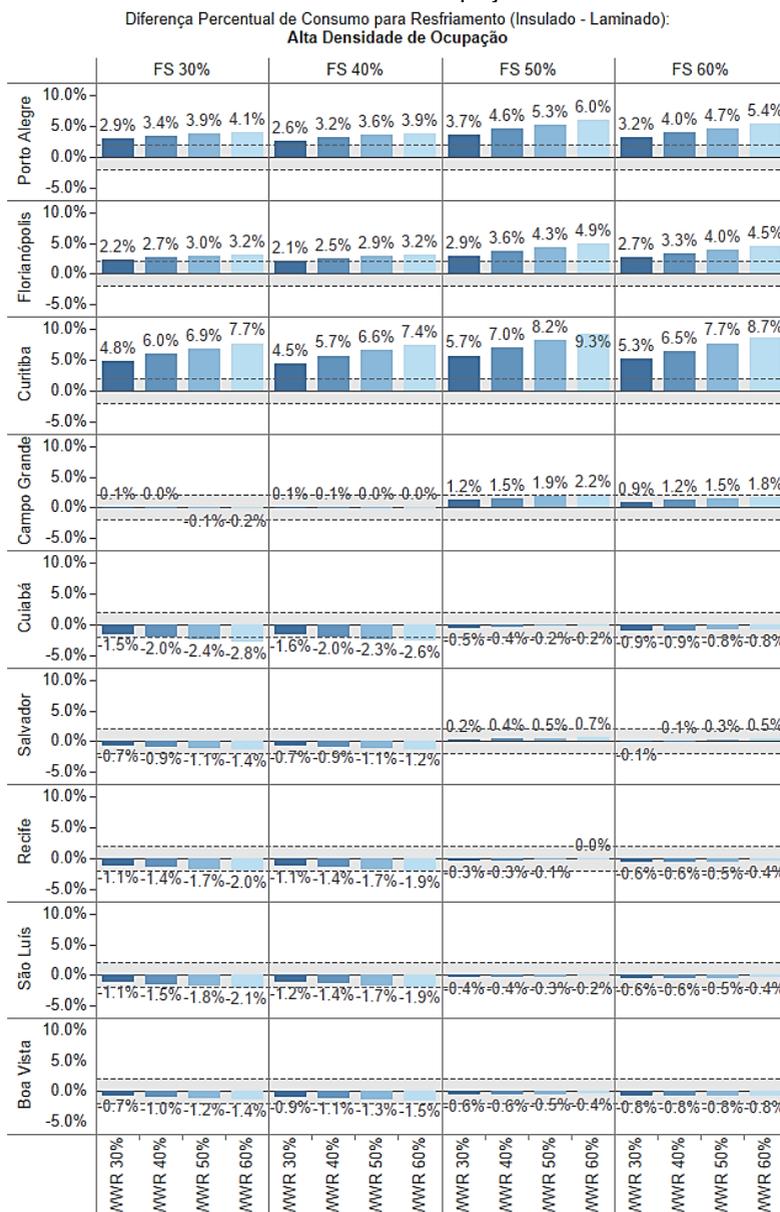
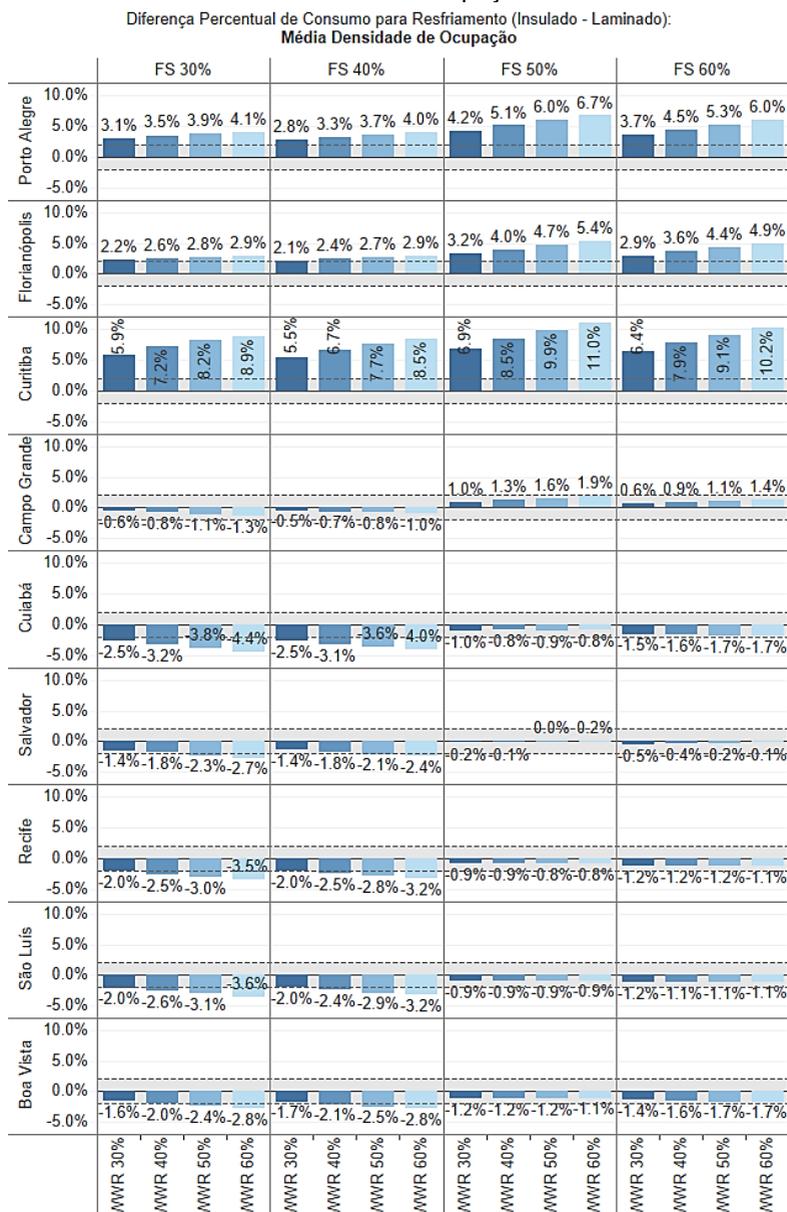


Figura 51 - Diferença percentual de consumo para resfriamento entre modelos com vidro insulado e modelos com vidro laminado: média densidade de ocupação.



Com base nos percentuais positivos, observa-se que para Porto Alegre, Florianópolis e Curitiba todos os modelos com vidro insulado obtiveram maior consumo anual com resfriamento comparado aos modelos com vidro laminado de mesmo FS e WWR. Curitiba apresentou as maiores diferenças de consumo entre os pares, com percentuais entre 4,5% (2,2 kWh/m² - FS 40% e WWR 30%) e 9,3% (4,8 kWh/m² - FS 50% e WWR 60%), para alta densidade de ocupação, e entre 5,5% (1,9 kWh/m² - FS 40% e WWR 30%) e 11,0% (4,3 kWh/m² - FS 50% e WWR 60%), para ocupação média. Observou-se a tendência de que esta diferença no consumo aumente quanto maior for o WWR.

Em contraponto, os percentuais negativos indicam que para Cuiabá, Salvador, Recife, São Luís e Boa Vista os modelos com vidro insulado apresentaram menor consumo energético para resfriamento comparado aos modelos com vidro laminado de mesmo FS e WWR. Entretanto, as diferenças de consumo entre os pares se mostraram bastante inferiores às encontradas para o grupo de cidades supracitadas. Observam-se diferenças próximas a zero para os modelos com fator solar entre 50% e 60%. Nos modelos com fator solar entre 30% e 40% as diferenças tendem a ser ligeiramente maiores. Para Cuiabá, por exemplo, a diferença percentual de consumo nos fatores solares 30% e 40% varia entre -1,5% (1,3 kWh/m² - FS 30% e WWR 30%) e -2,8% (2,6 kWh/m² - FS 30% e WWR 60%), quando com alta densidade de ocupação, e entre -2,5% (1,7 kWh/m² - FS 30% e WWR 30%) e -4,4% (3,1 kWh/m² - FS 30% e WWR 60%), quando com ocupação média.

Campo Grande apresenta diferenças percentuais próximas a zero para a maior parte de pares de modelos, sendo a diferença mais alta de 2,2% (1,8 kWh/m² - FS 50% e WWR 60, quando com alta densidade de ocupação, e 1,9% (1,2 kWh/m² - FS 50% e WWR 60%), quando com ocupação média. Nos fatores solares de 30% e 40%, as diferenças se mantêm próximas a zero, portanto pode-se considerá-las equivalentes. Nos modelos com fator solar entre 50% e 60% as diferenças tendem a ser ligeiramente maiores, indicando maior consumo para os modelos com vidro insulado. Este padrão permanece para as duas densidades de ocupação.

Tendo como base os resultados de consumo energético com condicionamento do ar obtidos por meio das simulações computacionais, produziram-se a Tabela 26 e a Tabela 27. Estas

apresentam o tipo de vidro indicado para cada cenário, de acordo com a densidades de ocupação. Cada cenário corresponde a combinação entre uma cidade, um WWR e um FS. Esta ordem foi pensada como a sequência de decisões do projetista: projeta-se para um local específico, o projeto arquitetônico estipula o percentual de área de abertura das fachadas e então escolhe-se o vidro adequado.

Observa-se uma divisão clara em que, nas cidades localizadas na região sul do país (região de clima temperado), os modelos com vidro insulado apresentam consumo significativamente maior do que modelos com vidro laminado, ao passo que, nas cidades com latitude maiores à -20° (a partir de Campo Grande em direção ao norte), os modelos com vidro insulado e com vidro laminado apresentaram consumos com resfriamento predominantemente equivalentes (diferenças inferiores a 2%). O padrão manteve-se para as duas densidades de ocupação, sendo que na densidade média ocorreu maior frequência de cenários em que o uso do vidro insulado demonstrou maior economia no consumo com resfriamento para o segundo grupo de cidades. Os casos em que o uso do vidro insulado representou economia energética em relação ao uso do vidro não insulado ocorreram em cenários com fator solar reduzido (30% e 40%) e, predominantemente, em modelos com maior WWR. Campo grande apresentou apenas um cenário em que o vidro laminado demonstrou vantagem significativa (WWR 60% e FS 50%).

Tabela 26 - Tipo de vidro indicado para cada cenário: alta densidade de ocupação.

Cidade	WWR 30%				WWR 40%				WWR 50%				WWR 60%			
	FS 30%	FS 40%	FS 50%	FS 60%	FS 30%	FS 40%	FS 50%	FS 60%	FS 30%	FS 40%	FS 50%	FS 60%	FS 30%	FS 40%	FS 50%	FS 60%
Porto Alegre	LAM	LAM	LAM	LAM												
Florianópolis	LAM	LAM	LAM	LAM												
Curitiba	LAM	LAM	LAM	LAM												
Campo Grande	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	LAM	INS
Cuiabá	INS	INS	INS	INS												
Salvador	INS	INS	INS	INS												
Recife	INS	INS	INS	INS												
São Luís	INS	INS	INS	INS												
Boa Vista	INS	INS	INS	INS												

Legenda:

Vidros Laminados
 Vidros Insulados
 Indiferente

Tabela 27 - Tipo de vidro indicado para cada cenário: média densidade de ocupação.

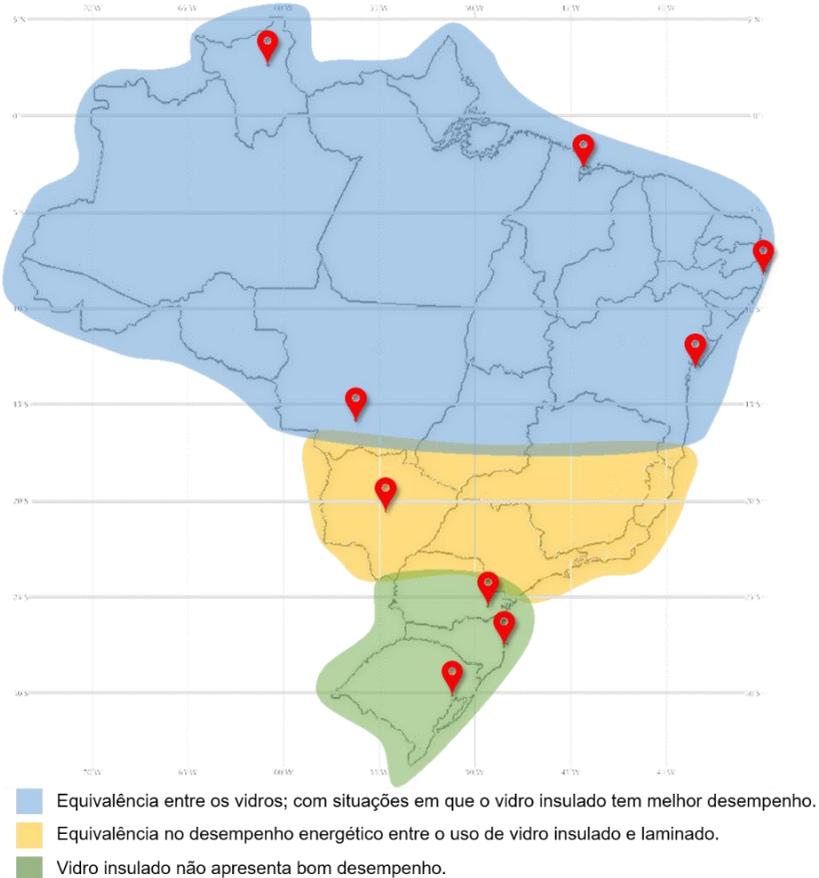
Cidade	WWR 30%				WWR 40%				WWR 50%				WWR 60%			
	FS 30%	FS 40%	FS 50%	FS 60%	FS 30%	FS 40%	FS 50%	FS 60%	FS 30%	FS 40%	FS 50%	FS 60%	FS 30%	FS 40%	FS 50%	FS 60%
Porto Alegre	LAM	LAM	LAM	LAM												
Florianópolis	LAM	LAM	LAM	LAM												
Curitiba	LAM	LAM	LAM	LAM												
Campo Grande	INS	INS	INS	INS												
Cuiabá	INS	INS	INS	INS												
Salvador	INS	INS	INS	INS												
Recife	INS	INS	INS	INS												
São Luís	INS	INS	INS	INS												
Boa Vista	INS	INS	INS	INS												

Legenda:

Vidros Laminados
 Vidros Insulados
 Indiferente

A Figura 52 demonstra geograficamente os resultados encontrados. Na região mais a sul (em verde) o vidro insulado não apresentou resultados positivos. Na área central (em amarelo) os resultados mostraram-se equivalente quanto ao uso de vidros insulados e laminados. Na zona mais a norte (em azul), a maioria das situações demonstra indiferença no uso do vidro insulado e vidro laminado em relação ao desempenho termoenergético, porém, em certas combinações de parâmetros o uso de vidro insulado demonstrou melhor desempenho.

Figura 52 - Mapa demonstrativo dos resultados de diferença de consumo energético com condicionamento de ar: insulado x laminado.



Fonte: elaborado pela autora.

5.2.2 Relação entre consumo energético e temperatura do ar externo

A fim de entender a conexão do clima local com a utilização de vidros insulados relacionou-se o consumo energético diário para condicionamento do ar com a temperatura média diária externa do ar para um período de verão e um período de inverno por meio de gráficos de barras combinado à gráficos de áreas. As barras representam a temperatura média diária do ar externo e a linha tracejada indica a temperatura de resfriamento definida para o termostato do sistema de condicionamento de ar. As áreas expõem a diferença de consumo energético diário com resfriamento do ar entre o modelo de vidro insulado e o de vidro laminado com mesmo FS e WWR. Quando esta diferença é um valor negativo significa que o consumo do modelo de vidro insulado é menor do que o de vidro laminado. Observaram-se dois períodos de cinco semanas consecutivas, um de verão e outro de inverno. Os dias em que não há consumo com condicionamento do ar correspondem aos fins de semana.

Para esta análise, selecionaram-se os pares de modelos (com mesmo FS e WWR) de cada cidade que obtiveram a maior diferença entre os consumos energéticos com resfriamento do ar. Durante este capítulo os padrões de resultados encontrados são ilustrados por intermédio de cinco das nove cidades estudadas, em modelos de alta densidade de ocupação. Os demais resultados podem ser observados no Apêndice A..

Para Curitiba os modelos com FS 50% e WWR 60% apresentaram a maior diferença de consumo entre os tipos de vidro utilizados. A Figura 53 demonstra os resultados desta cidade no período de verão e a Figura 54 no inverno. Observa-se que durante os dois períodos o modelo com vidro insulado apresentou maior consumo que o modelo com vidro laminado. A diferença diária máxima no verão foi 26,5 kWh e no inverno, 41,9 kWh. Considerando os dados do arquivo climático utilizado, Curitiba possui temperatura média do ar de 17,2°C, com temperatura média diária máxima de 25,1°C e mínima de 7,5°C. Deste modo, a temperatura média diária se mantém abaixo ou próxima à temperatura de *setpoint* de resfriamento (24°C), ou seja, a temperatura interna do ar mantida pelo sistema de

condicionamento térmico durante todo o período de funcionamento do escritório.

Figura 53 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de **Verão**: Modelo Laminado X Insulado. **Curitiba**, FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

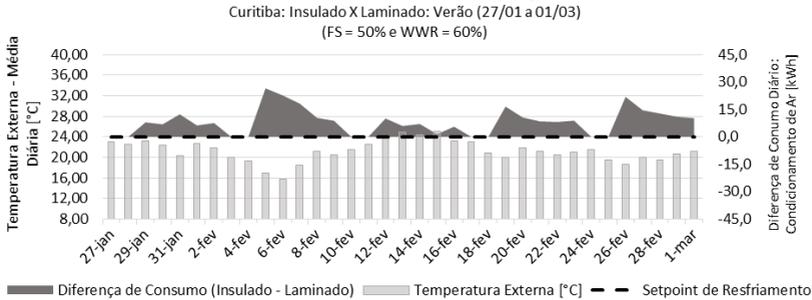
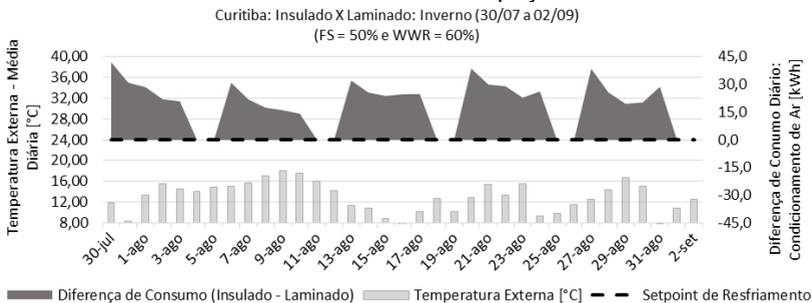


Figura 54 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de **Inverno**: Modelo Laminado X Insulado. **Curitiba**, FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.



Em Porto Alegre a diferença de consumo energético diário com resfriamento também é significativa no período de inverno (até 35,3 kWh), como pode ser observado na Figura 55. Neste período, as temperaturas médias diárias se mantiveram abaixo dos 22°C. De forma distinta à Curitiba, no período de verão a diferença no consumo diário em condicionamento de ar não é expressiva, sendo no máximo de 12,6 kWh (Figura 56). Em geral, os modelos com vidro insulado apresentam maior consumo neste período, porém nota-se que o consumo do modelo com vidro insulado foi menor entre os dias 27 e 31 de janeiro, intervalo em

que as temperaturas do ar externo permaneceram acima dos 24°C. Nestas semanas de verão as temperaturas médias do ar permaneceram entre 20°C e 29°C, isto é, a diferença entre a temperatura média diária do ar externo e a temperatura do ambiente interno esteve continuamente baixa. Os modelos de Florianópolis apresentaram comportamento semelhante ao observado em Porto Alegre.

Figura 55 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de **Inverno**: Modelo Laminado X Insulado. **Porto Alegre**, FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

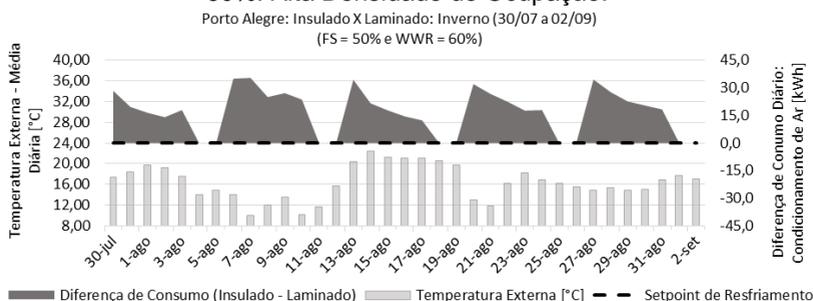
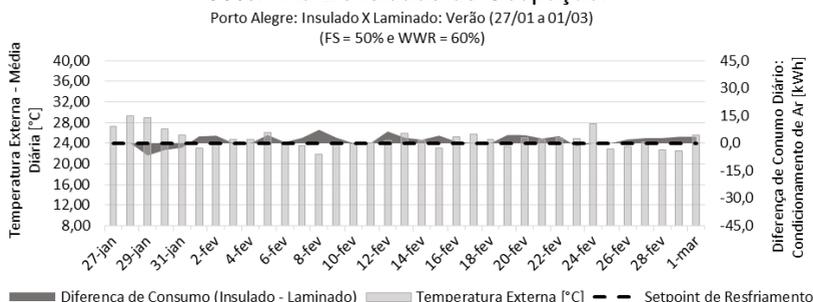


Figura 56 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de **Verão**: Modelo Laminado X Insulado. **Porto Alegre**, FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.



Como pode ser observado na Figura 57 e na Figura 58, Campo Grande segue o mesmo padrão destas cidades, entretanto, a temperatura média diária no período de inverno esteve entre 13°C e 28°C, com média de 23,4°C. Por consequência, a diferença entre os modelos é consideravelmente menor do que ocorreu nas outras duas cidades (19,5 kWh).

O oposto ocorre para a cidade de Salvador. No período de verão (Figura 59), o modelo com vidro insulado obteve consumos diários para resfriamento do ar menores do que o modelo com vidro laminado. Esta diferença foi de até 15,8 kWh. Nestas semanas, as temperaturas do ar externo permaneceram entre 24°C e 30°C, sempre um pouco acima da temperatura mantida internamente pelo sistema de condicionamento térmico. Durante o inverno (Figura 60) a temperatura média diária do ar externo é 24,3°C, com pouca variação. Consequentemente, ocorre o mesmo padrão de Porto Alegre, Florianópolis e Campo Grande no verão, em que a diferença no consumo é inexpressiva, sendo no máximo de 5,2 kWh.

Figura 57 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado X Insulado. **Campo Grande**, FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

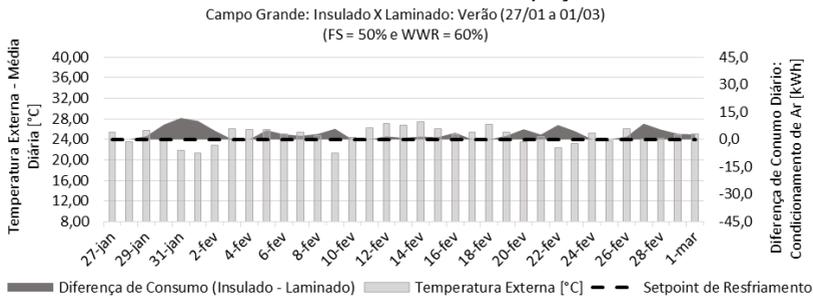


Figura 58 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de **Inverno**: Modelo Laminado X Insulado. **Campo Grande**, FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

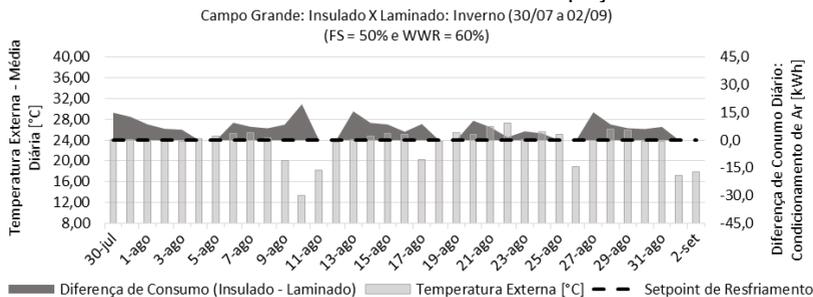


Figura 59 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de **Verão**: Modelo Laminado X Insulado. **Salvador**, FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

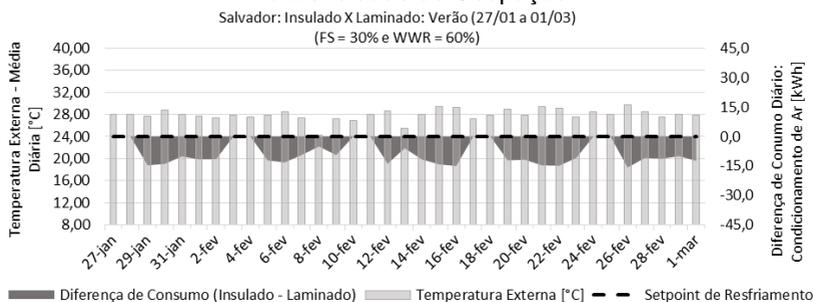
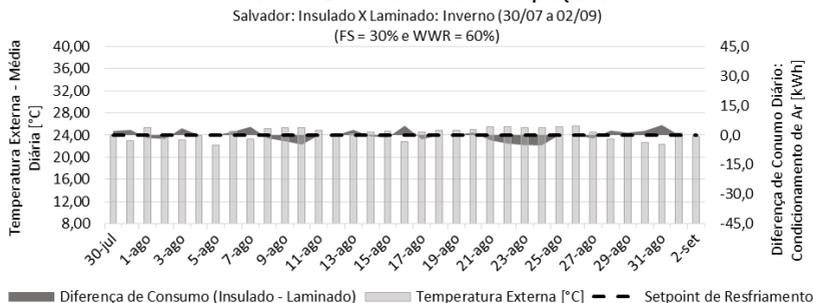


Figura 60 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de **Inverno**: Modelo Laminado X Insulado. **Salvador**, FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.



Com temperaturas do ar externo continuamente acima ou próximas à temperatura de *setpoint* para resfriamento (24°C), Cuiabá, Recife, São Luís e Boa Vista apresentam padrão semelhantes, em que o modelo com vidro insulado apresentou menor consumo em condicionamento do ar, comparado ao modelo com vidro laminado durante os dois períodos analisados. A principal característica análoga a estas cidades é o fato de haver pouca variação das temperaturas externas ao longo do ano. Evidencia-se este fato na Tabela 28 onde se observam as temperaturas médias do ar externo, diária máxima e diária mínima para o período de verão e para o de inverno nestas cidades. Apenas Cuiabá apresenta maior amplitude de temperatura no período de inverno do que no verão. Por este aspecto, não há diferenciação expressiva no comportamento diário da edificação entre os períodos de verão e inverno para estas quatro cidades, como é exemplificado através dos resultados para São Luís na Figura 61 (verão) e Figura 62 (inverno). Para Recife, São Luís e Boa Vista, as diferenças diárias mostraram-se semelhantes (até 15,2 kWh por dia), enquanto Cuiabá apresentou maior disparidade (atingindo 24,2 kWh por dia).

Tabela 28 - Temperatura do ar no verão e no inverno: Cuiabá, Recife, São Luís e Boa Vista.

Cidade	Temperatura Média [°C]		Temperatura Máxima [°C]		Temperatura Mínima [°C]	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Cuiabá	27,3	27,0	31,2	31,8	24,3	16,7
Recife	28,1	25,7	29,1	27,1	25,2	22,9
São Luís	26,8	26,7	28,2	27,4	23,8	25,9
Boa Vista	28,0	27,1	29,3	29,1	25,3	24,2

Figura 61 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de **Verão**: Modelo Laminado X Insulado. **São Luís**, FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

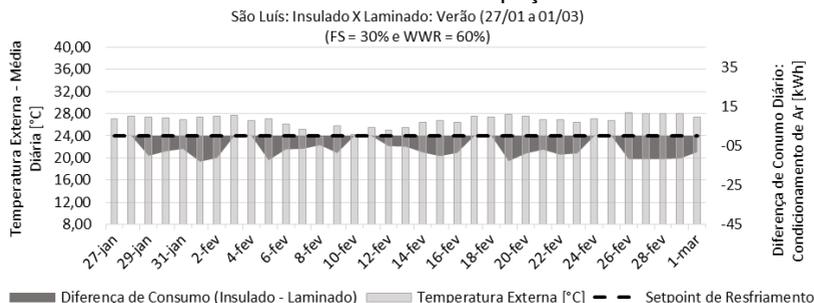
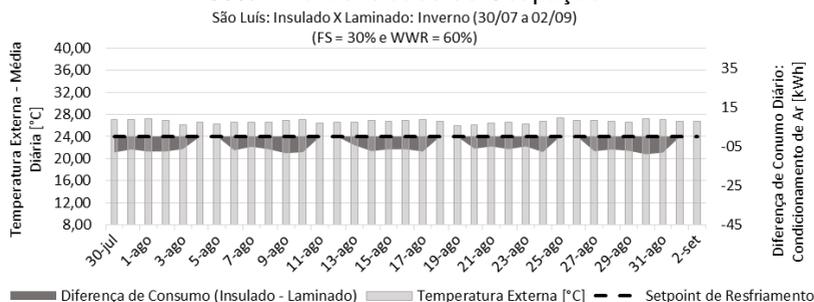


Figura 62 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de **Inverno**: Modelo Laminado X Insulado. **São Luís**, FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.



Entende-se que estas relações ocorrem devido ao isolamento térmico gerado pela câmara de ar presente na composição de vidros insulados. Nota-se também que, em todos os casos, quanto menor for a diferença entre a temperatura externa do ar e a temperatura no interior da edificação, mantida entre 20°C e 24°C pelo sistema de condicionamento de ar, menor será a influência da transmitância térmica do vidro no desempenho energético da edificação. Conseqüentemente, menor será a diferença de consumo de ar condicionado entre os modelos com vidro insulado e vidro laminado.

Além disso, observa-se que no início da semana há maior diferença de consumo, porém tende a se aproximar no decorrer do período. Este fato ocorre, pois durante o fim de semana o ar

condicionado permanece desligado, desta forma o vidro laminado consegue dissipar o calor para o ambiente externo com maior facilidade que o vidro insulado. Assim, os modelos com vidro laminado iniciam a semana com seu interior mais resfriado, porém, devido à alta carga térmica gerada no interior da edificação, o consumo diário com condicionamento de ar tende a se aproximar no decorrer da semana.

5.2.3 Relações entre os parâmetros variáveis e o consumo energético

Analisaram-se as relações entre os parâmetros variáveis (FS, WWR e tipo de vidro) e o consumo energético com resfriamento previsto para cada cidade. Observaram-se tanto os modelos com alta densidade de ocupação quanto os de densidade média.

Dentre os modelos simulados para Porto Alegre (Figura 63 e Figura 64), Florianópolis (Figura 65 e Figura 66) e Curitiba (Figura 67 e Figura 68), os de menor consumo energético para resfriamento foram aqueles com vidro laminado, FS 30% e WWR 60%. Para Florianópolis, os menores consumos dentre os modelos com média densidade de ocupação foram os modelos com vidro laminado e FS 30% (a diferença entre os quatro WWR foi de apenas 0,3%). Os modelos que apresentaram o maior consumo foram e aqueles com vidros insulados com fator solar entre 40% e 50% e WWR de 60%. Para estas cidades, seguiu-se o mesmo padrão para as duas densidades de ocupação analisadas. Neste grupo, a diferença percentual máxima de consumo com resfriamento entre os modelos simulados manteve-se entre 20,4% e 28,2% para alta densidade de ocupação, e entre 26,0% e 38,5% para densidade média.

Figura 63 - Consumo elétrico anual para resfriamento: **Porto Alegre.**
Alta densidade de ocupação.

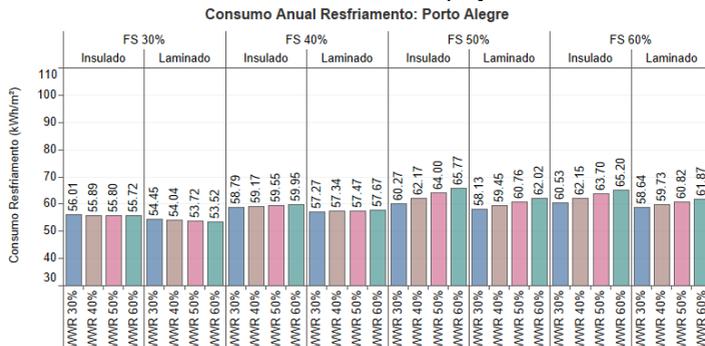


Figura 64 - Consumo elétrico anual para resfriamento: **Porto Alegre.**
Média densidade de ocupação.

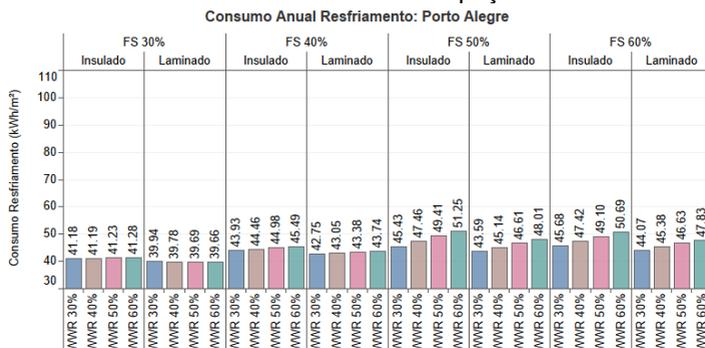


Figura 65 - Consumo elétrico anual para resfriamento: **Florianópolis.**
Alta densidade de ocupação.

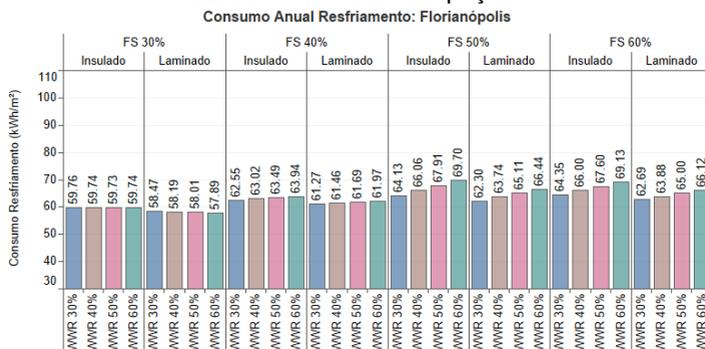


Figura 66 - Consumo elétrico anual para resfriamento: **Florianópolis**. Média densidade de ocupação.

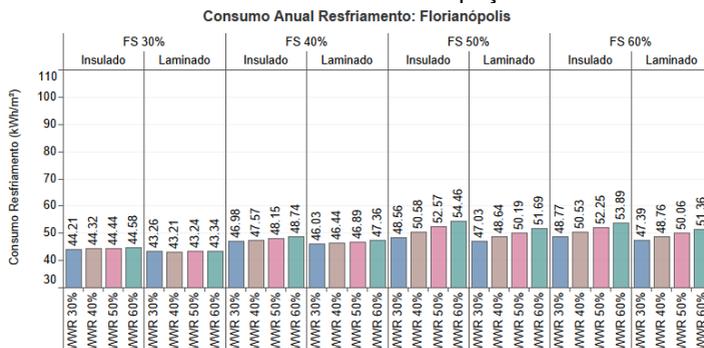


Figura 67 - Consumo elétrico anual para resfriamento: **Curitiba**. Alta densidade de ocupação.

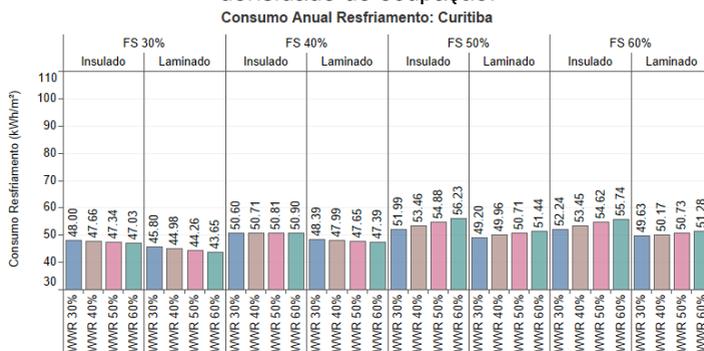
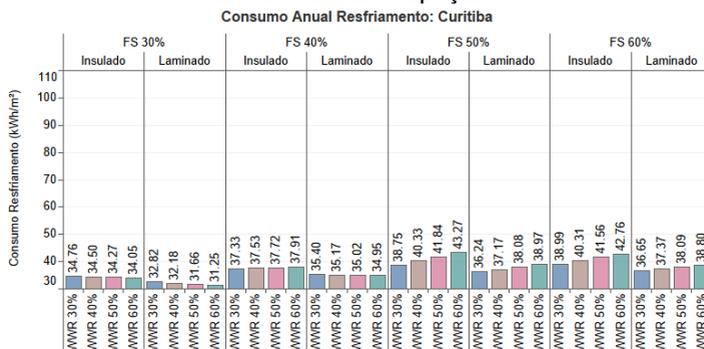


Figura 68 - Consumo elétrico anual para resfriamento: **Curitiba**. Média densidade de ocupação.



Ao contrário do ocorrido no grupo citado anteriormente, para Cuiabá (Figura 69 e Figura 70), Recife (Figura 71 e Figura 72), São Luís (Figura 73 e Figura 74) e Boa Vista (Figura 75 e Figura 76) os modelos de menor consumo para resfriamento foram os com vidro insulado, FS 30% e WWR de 30%. Para este grupo de cidades, os modelos que apresentaram maior consumo foram os com vidro laminado de FS entre 50% e 60% e WWR de 60%. A diferença percentual máxima de consumo com resfriamento entre os modelos simulados manteve-se entre 12,2% e 16,6% para alta densidade de ocupação, e entre 17,7% e 23,1% para densidade média.

Figura 69 - Consumo elétrico anual para resfriamento: **Cuiabá. Alta** densidade de ocupação.

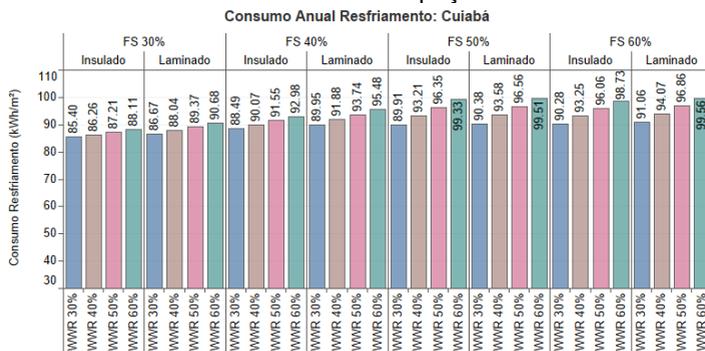


Figura 70 - Consumo elétrico anual para resfriamento: **Cuiabá. Média** densidade de ocupação.

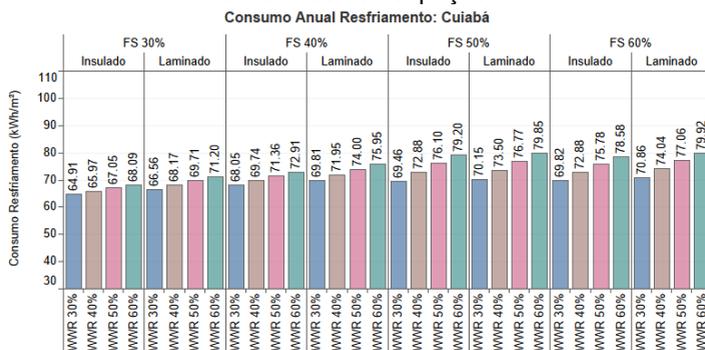


Figura 71 - Consumo elétrico anual para resfriamento: **Recife. Alta** densidade de ocupação.

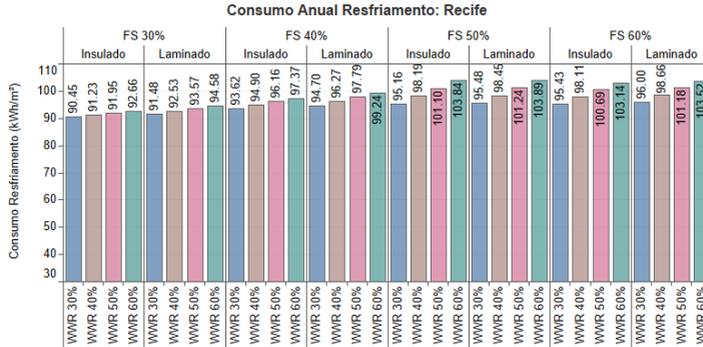


Figura 72 - Consumo elétrico anual para resfriamento: **Recife. Média** densidade de ocupação.

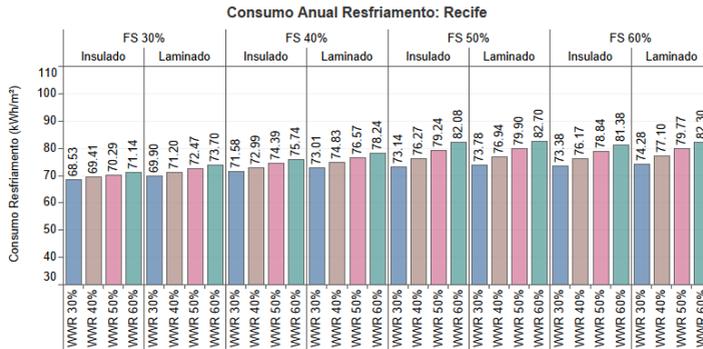


Figura 73 - Consumo elétrica anual para resfriamento: **São Luís. Alta** densidade de ocupação.

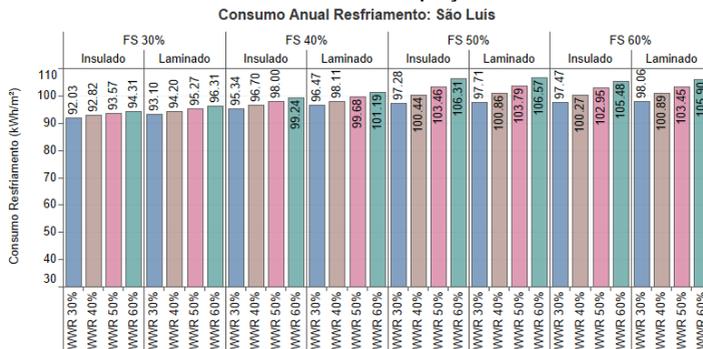


Figura 74 - Consumo elétrica anual para resfriamento: **São Luís. Média** densidade de ocupação.

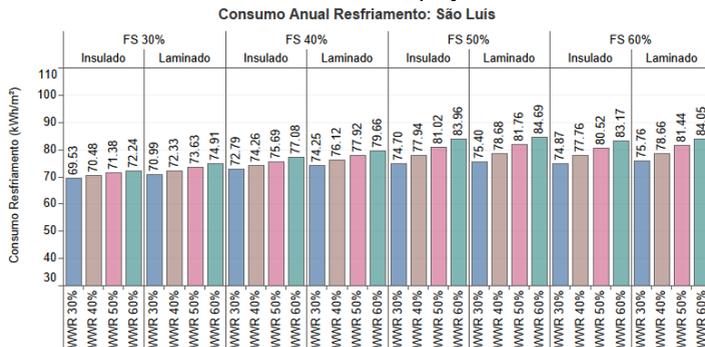


Figura 75 - Consumo elétrico anual para resfriamento: **Boa Vista. Alta** densidade de ocupação.

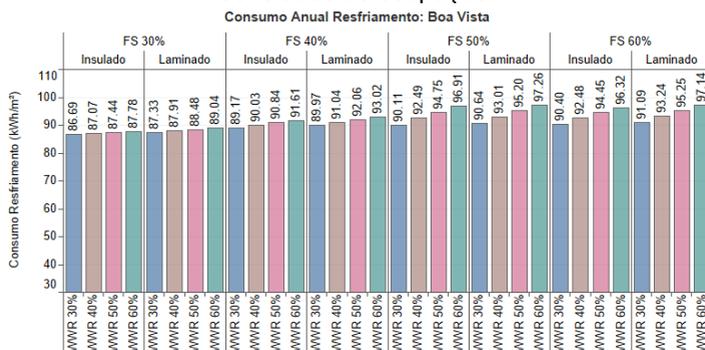
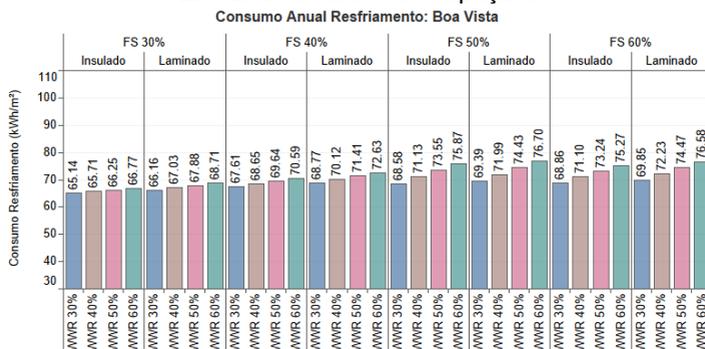


Figura 76 - Consumo elétrico anual para resfriamento: **Boa Vista. Média** densidade de ocupação.



Campo Grande apresenta diferença do modelo de menor consumo para alta densidade de ocupação e média densidade de ocupação (Figura 77 e Figura 78). O modelo de menor consumo para resfriamento foi o com vidro laminado de FS 30% e WWR 30%, para alta densidade, e o com vidro insulado com mesmo FS e WWR, para média densidade. Já o modelo de maior consumo coincide para as duas densidades, sendo o modelo com vidro insulado de FS 50% e WWR 60%. Todavia, é importante ressaltar que a diferença de consumo entre os modelos com FS 30% e WWR 30% é de apenas 0,1% (0,09 kWh/m²), para densidade alta, e 0,6% (0,26 kWh/m²), para média densidade.

Figura 77 - Consumo elétrico anual para resfriamento: **Campo Grande.**
Alta densidade de ocupação.

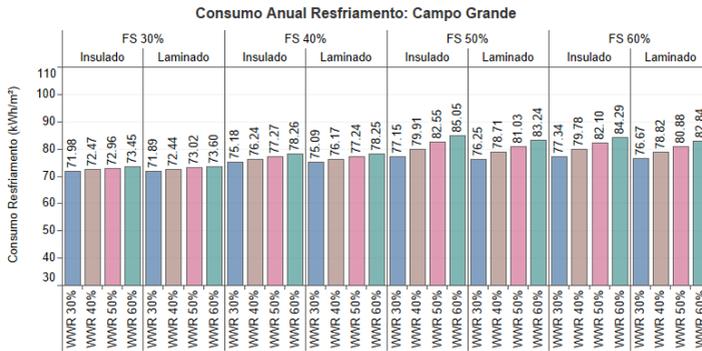
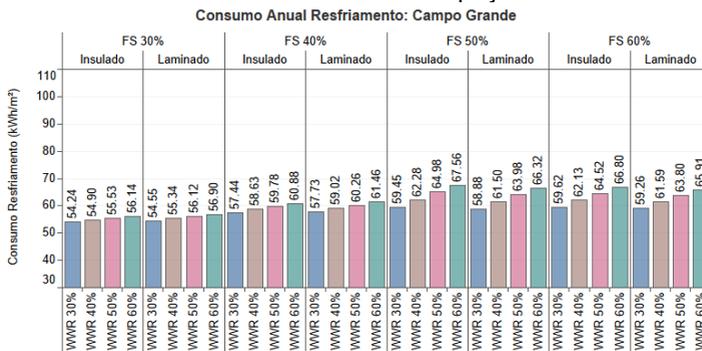


Figura 78 - Consumo elétrico anual para resfriamento: **Campo Grande.**
Média densidade de ocupação.



Diferentemente das demais cidades, para Salvador, tanto o modelo com menor consumo para resfriamento como aquele com maior consumo possuem vidro insulado. O modelo de menor consumo foi o de FS 30% e WWR 30%. O modelo de maior consumo foi o de FS 50% e WWR 60%. Entretanto observa-se que a diferença de consumo entre os modelos com vidro insulado e laminado é reduzida para esta cidade. Como visto na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e na Figura 51, a disparidade tende a manter-se abaixo de 2%, sendo ainda menor nos modelos com FS mais altos (50% e 60%). Quando há pouca diferença de temperatura entre o interior da edificação e a temperatura externa, ao ampliar o WWR, aumenta-se a área para dissipação do calor por condução, mas também eleva a área de ganho de calor por radiação solar e por condução, equiparando-se os modelos.

Figura 79 - Consumo elétrico anual para resfriamento: **Salvador. Alta** densidade de ocupação.

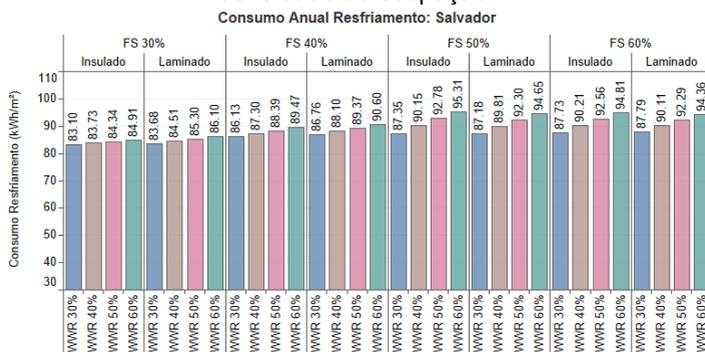
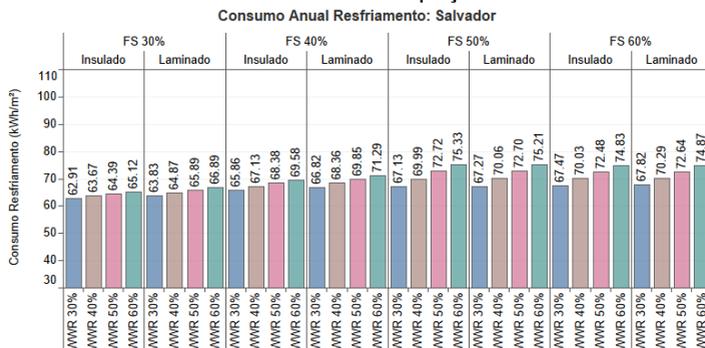
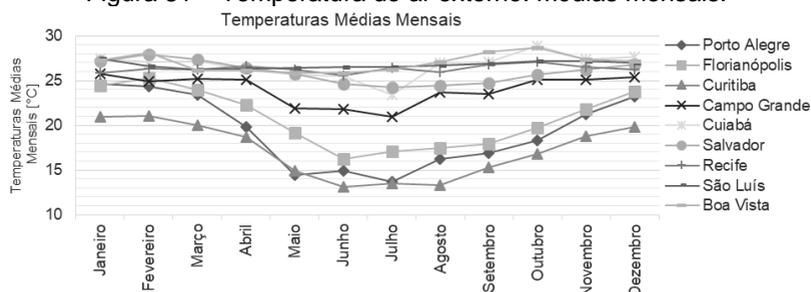


Figura 80 - Consumo elétrico anual para resfriamento: **Salvador. Média** densidade de ocupação.



Relacionando os dados mencionados anteriormente às temperaturas mensais do ar externo das cidades estudadas (Figura 81), nota-se que a diferença de consumo com resfriamento entre modelos com a mesma densidade de ocupação tende a ser maior em cidades com temperatura do ar médias anuais mais baixas, como Porto Alegre, Florianópolis e Curitiba.

Figura 81 – Temperatura do ar externo: médias mensais.



Espera-se que o consumo dos modelos com mesmo vidro aumente conforme o percentual de abertura da fachada se amplia. Todavia, identificou-se que nas cidades com clima mais ameno, Porto Alegre, Florianópolis e Curitiba, nos cenários com fator solar de 30% e 40%, os modelos não apresentaram variação significativa no consumo energético para resfriamento (variação menor do que 1 kWh/m²). Além disso, notou-se que nos cenários com vidro laminado e fator solar de 30% para Curitiba, o consumo com resfriamento diminuiu conforme ampliou-se o WWR. A redução no consumo, comparando o modelo com WWR 30% para o modelo com WWR 60%, foi de aproximadamente 5% nas duas densidades de ocupação.

Vidros com baixo fator solar possuem maior controle na transmissão de radiação solar de onda longa (infravermelho), por conseguinte agregam menos carga térmica ao ambiente interno. Quando a temperatura no meio externo se mantém menor que no interior do edifício, com menor ganho de calor por radiação solar, a dissipação do calor interno por condução através das janelas torna-se mais efetiva. Complementarmente, aumentando-se a área envidraçada, esta perda de calor através da envoltória é potencializada. Cabe salientar que as fachadas não recebem

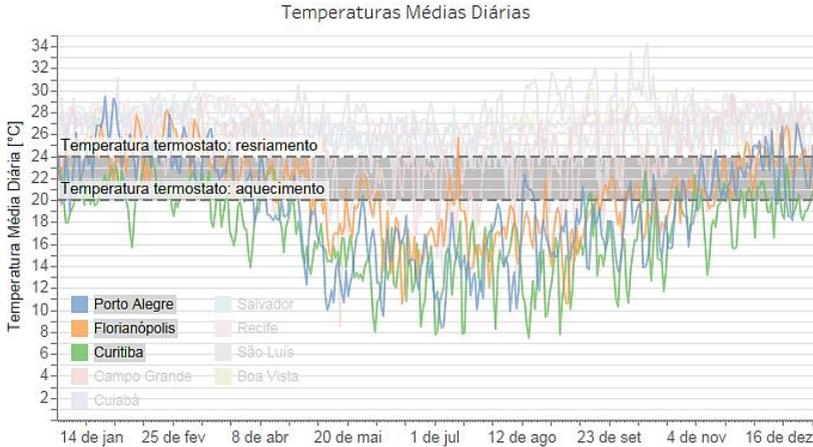
radiação solar direta durante todo dia. Nos momentos em que não há este ganho, a dissipação de calor pelo vidro é mais efetiva.

Em contrapartida, para os modelos de Campo Grande, Cuiabá, Salvador, Recife, São Luís e Boa Vista, a hipótese inicial se aplica integralmente, porém, como era esperado, nota-se que quanto menor o fator solar do vidro, menor é a influência do WWR no consumo para resfriamento. Por exemplo, para os modelos de média densidade de ocupação de Cuiabá, o consumo para resfriamento do ar nos modelos com vidro insulado e FS 30% variam em até 4,7%, enquanto o consumo nos modelos de vidro insulado com FS 50% variam em até 12,3%.

A Figura 82 indica as temperaturas médias diárias ao longo do ano, com destaque para os dados de Porto Alegre, Florianópolis e Curitiba. As linhas tracejadas indicam as temperaturas de termostato de aquecimento e resfriamento definidas para os sistemas de condicionamento do ar. Nota-se que, apesar de as cidades Porto Alegre, Florianópolis e Curitiba apresentarem temperaturas médias do ar externo abaixo de 20°C nos meses de inverno, poucos modelos de Porto Alegre e de Curitiba apresentaram consumo energético para aquecimento e, ainda assim, com valores desprezíveis, mesmo nos modelos de ocupação média. Os consumos para aquecimento mantiveram-se abaixo de 0,001 kWh/m², quando com alta densidade, e 0,004 kWh/m², quando com média densidade. Os modelos de Florianópolis não apresentaram consumo para aquecimento. Outra observação importante é que, mesmo no período do ano com temperaturas do ar externo mais baixas, o sistema de condicionamento permanece em funcionamento resfriando os ambientes.

Este fenômeno ocorre principalmente em consequência da combinação de dois fatores: a carga gerada no interior da edificação e o seu horário de funcionamento predominantemente diurno. Além disso, o período de funcionamento dos escritórios tende a coincidir com os intervalos de temperaturas mais elevadas e maior ganho de radiação solar durante o dia. Consta-se, portanto, necessidade de resfriamento do ar durante todo o ano. Os modelos das demais cidades não apresentaram consumo energético para aquecimento.

Figura 82 - Temperaturas médias diárias. Destaque para: Porto Alegre, Florianópolis e Curitiba.



5.2.4 Consumo energético por zona térmica

Comparou-se a diferença percentual no consumo energético para resfriamento entre os modelos com vidro insulado e vidro laminado, observando o consumo global para resfriamento e o consumo por zonas térmicas localizadas junto à envoltória. Estes resultados são apresentados em forma de gráficos de colunas como na Figura 83, onde os valores positivos indicam que o modelo com vidro insulado obteve maior consumo em relação ao modelo com vidro laminado. Como no item 5.2.1, determinou-se um intervalo de +2% a -2% no qual se considerou que os modelos obtiveram consumos equivalentes. Ao longo do texto será apresentada uma amostra dos resultados encontrados como forma de ilustrar as análises subsequentes. Os demais gráficos podem ser observados no Apêndice B.

Foi possível observar que as relações entre os parâmetros variáveis (FS, WWR e tipo de vidro) e o consumo energético com resfriamento previsto tendem a seguir nas zonas térmicas próximas à fachada, os mesmos padrões gerais do consumo global, em todos os modelos. Esperava-se que as relações entre os parâmetros seriam diferentes conforme a orientação solar fosse alterada, de forma que cada fachada possuísse uma combinação “ideal” de fatores diferenciada, no tocante ao desempenho térmico

do ambiente. Este comportamento não foi identificado provavelmente em decorrência do uso das persianas, as quais foram modeladas para fechamento quando houvesse radiação solar incidente acima de 250 W/m^2 .

Entende-se, portanto, que a relação entre a temperatura do ar externo e a temperatura mantida no ambiente interno terá um papel mais significativo na praticabilidade do uso de vidros do tipo insulado nos climas brasileiros, do que o ganho térmico por radiação solar, principalmente considerando o uso de persianas internas. Isto ocorre pelo fato de o aumento no isolamento térmico da envoltória ser a principal característica de distinção entre composições de vidros insulados e outras composições de vidros, que também possuem o intuito de melhorar o desempenho térmico de edificações. A redução na transmitância térmica diminui a influência do ambiente externo no interior do edifício, mas também dificulta a dissipação da alta carga térmica interna (ondas longas) por condução através do vidro.

Apesar das zonas seguirem o mesmo padrão geral de consumo, notam-se algumas variações na diferença percentual de consumo para resfriamento entre o uso do vidro insulado e do vidro laminado. Notou-se que, para Porto Alegre, Florianópolis e Curitiba, as zonas orientadas a leste, norte e oeste tendem a ter o mesmo padrão de variação na diferença de consumo entre os diferentes tipos de vidros, com variação significativa entre os modelos de alto e baixo fator solar. Nestas orientações a variação no consumo entre os modelos com vidro de menor FS (30% e 40%) e de maior FS (50% e 60%), considerando os mesmos WWR, fica entre 1,8 p.p. e 6,2 p.p. No geral, a variação entre as zonas térmicas nos modelos das cidades na região sul do Brasil encontra-se entre 0,9 p.p. e 7,4 p.p. Na zona térmica sul, a diferença de consumo entre o uso de vidro insulado e laminado é mais elevada do que nas demais orientações e mais homogênea entre os diferentes FS.

Em Curitiba, a diferença entre os modelos com vidro insulado e laminado é significativamente maior do que nas outras duas cidades, sendo entre 5,3% e 17,6%, ao passo que em Porto Alegre varia entre 2,3% e 8,9%, e em Florianópolis entre 1,3% e 7,9%. Nas três cidades, as menores diferenças foram obtidas nas fachadas leste, norte e oeste, nos modelos com FS 30% e 40% e WWR 30%, enquanto as maiores diferenças foram na fachada sul,

nos modelos com FS 50% e 60% e WWR 50% e 60%. A variação entre as zonas térmicas mostrou tendência a aumentar quanto maior o fator solar. Exemplificando, a Figura 83 apresenta os gráficos de diferença percentual no consumo global e por zona térmica periférica entre modelos com vidro insulado e vidro laminado para a cidade de Porto Alegre.

Ao observar os resultados das demais cidades, Cuiabá, Salvador, Recife, São Luís e Boa Vista, constata-se menor variação entre as zonas térmicas por fachada, sendo entre 0,3 p.p. e 4,5 p.p. Notou-se que quanto menor a latitude e maior a temperatura média do ar, a diferença no consumo com resfriamento entre os dois tipos de vidro tende a equilibrar-se em todas orientações. Boa Vista é um exemplo desta situação. Como pode ser observado na Figura 84, a zona orientada a sul não apresenta divergência maior em relação às demais zonas térmicas.

Figura 83 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: **Porto Alegre. Alta** densidade de ocupação.

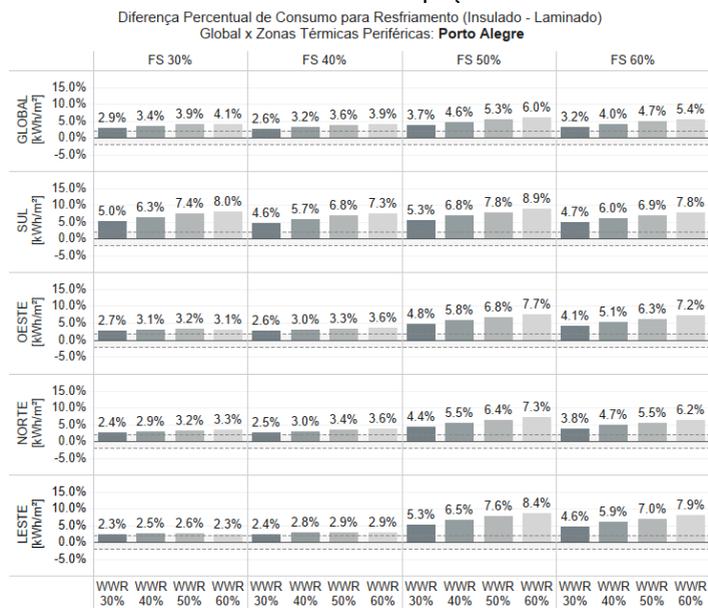


Figura 84 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: **Boa Vista. Alta** densidade de ocupação.

Diferença Percentual de Consumo para Resfriamento (Insulado - Laminado)
Global x Zonas Térmicas Periféricas: **Boa Vista**

	FS 30%				FS 40%				FS 50%				FS 60%			
GLOBAL [kWh/m ²]																
	-0.7%	-1.0%	-1.2%	-1.4%	-0.9%	-1.1%	-1.3%	-1.5%	-0.6%	-0.6%	-0.5%	-0.4%	-0.8%	-0.8%	-0.8%	-0.8%
SUL [kWh/m ²]																
													0.2%			
	-1.1%	-1.3%	-1.6%	-1.9%	-1.1%	-1.4%	-1.6%	-1.8%	-0.3%	-0.2%	0.0%		-0.7%	-0.7%	-0.6%	-0.6%
LESTE [kWh/m ²]																
													0.2%		0.5%	
	-1.3%	-1.7%	-2.1%	-2.5%	-1.4%	-1.6%	-2.0%	-2.4%	-0.2%	0.0%			-0.6%	-0.6%	-0.5%	-0.4%
NORTE [kWh/m ²]																
	-1.4%	-1.7%	-1.9%	-2.2%	-1.5%	-1.8%	-2.0%	-2.1%	-0.8%	-0.9%	-0.8%	-0.8%	-1.1%	-1.2%	-1.3%	-1.3%
OESTE [kWh/m ²]																
													0.1%			
	-0.9%	-1.4%	-1.9%	-2.3%	-1.1%	-1.5%	-1.9%	-2.3%	-0.9%	-0.6%	-0.3%		-0.9%	-0.9%	-0.9%	-0.8%
	WWR 30%	WWR 40%	WWR 50%	WWR 60%	WWR 30%	WWR 40%	WWR 50%	WWR 60%	WWR 30%	WWR 40%	WWR 50%	WWR 60%	WWR 30%	WWR 40%	WWR 50%	WWR 60%

Quando se observa a diferença na radiação média incidente em cada fachada da edificação estas relações ficam ainda mais evidentes. As Figura 85 e Figura 86 apresentam gráficos que relacionam o consumo com resfriamento nas zonas térmicas periféricas (considerando todos modelos por cidade) com a radiação solar média anual incidente em cada fachada para Porto Alegre, Florianópolis, São Luís e Boa Vista. Os gráficos das demais cidades podem ser observados no Apêndice CAPÊNDICE C. Nota-se que nas cidades localizadas em maiores latitudes, Porto Alegre e Florianópolis, a incidência média de radiação solar na fachada sul é significativamente menor comparada às demais fachadas. Paralelamente, em São Luís e Boa Vista, cidades contíguas à linha do equador, os valores de incidência média de radiação solar nas fachadas norte e sul aproximam-se. Isto posto, a relação de consumo energético para resfriamento entre as zonas térmicas está associada a quantidade de radiação incidente para

cada orientação, a qual irá modificar-se em função da localização geográfica.

Em Porto Alegre, Florianópolis, Curitiba e Campo Grande, observou-se também que, nos fatores solares mais baixos (30% e 40%), o consumo energético para resfriamento tende a ser menor quanto maior for o WWR. Este fato ocorreu principalmente nas zonas térmicas voltadas para sul e é enfatizado em modelos com vidro laminado. Entende-se que este fato ocorre, pois, nestes locais, a fachada sul recebe pouca radiação solar direta ao longo do ano. Deste modo, a zona térmica terá menos ganho de calor ao mesmo tempo em que aumentará o fluxo de perda do calor interno. Quanto maior for a área de abertura nesta orientação, maior será a dissipação de calor e, conseqüentemente, menor é o consumo com resfriamento. Exemplificando os dados supramencionados, a Figura 87 apresenta as diferenças percentuais de consumo energético com resfriamento para os modelos de alta densidade de ocupação na cidade de Curitiba.

Figura 85 - Relação entre consumo para resfriamento nas zonas térmicas e a radiação solar incidente: (a) Porto Alegre; (b) Florianópolis.

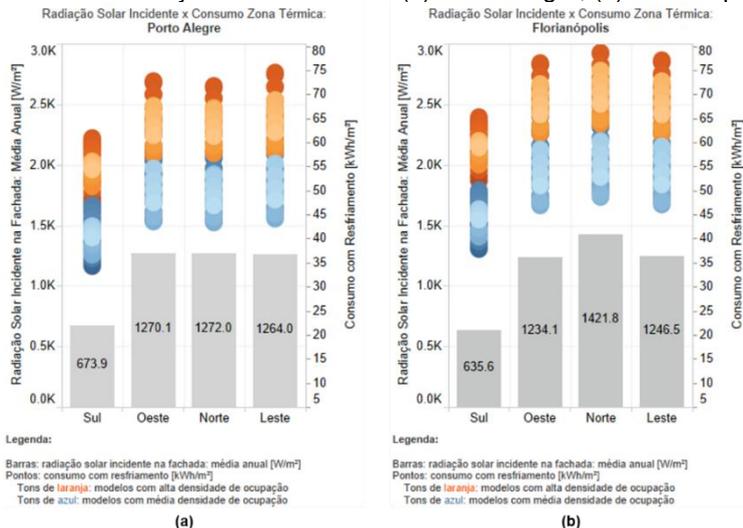


Figura 86 - Relação entre consumo para resfriamento nas zonas térmicas e a radiação solar incidente: (c) São Luís e (d) Boa Vista.

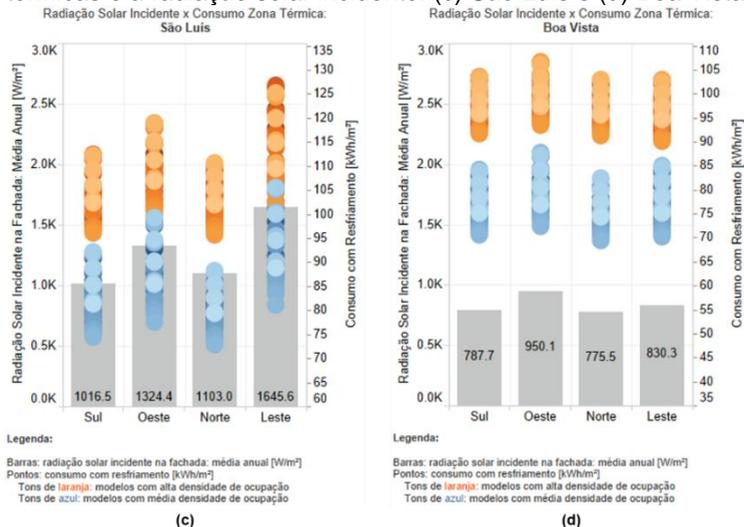
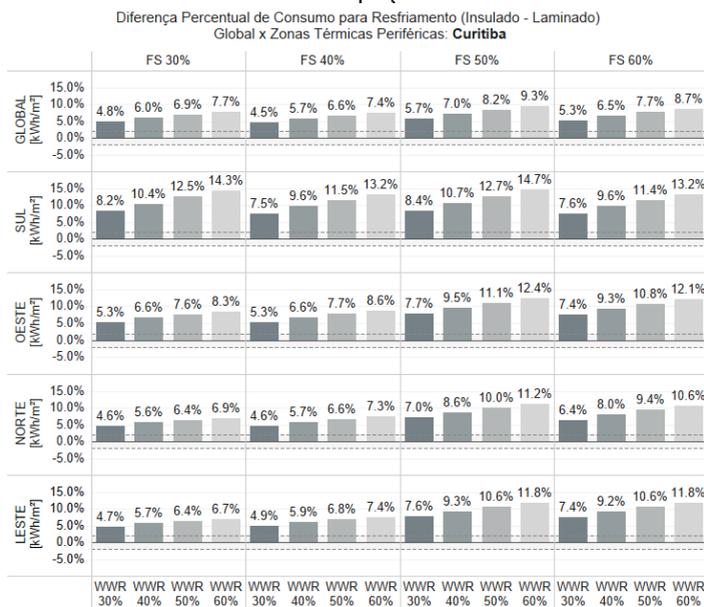


Figura 87 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Curitiba. Alta densidade de ocupação.



5.2.5 Variação na densidade de ocupação

A partir dos resultados obtidos para os modelos com alta densidade de ocupação questionou-se a existência de alteração nos padrões de consumo e na comparação entre os modelos ao diminuir a densidade de carga interna. Indiscutivelmente, os modelos com alta densidade de ocupação obtiveram valores de consumo para resfriamento mais elevados comparando-os aos modelos com média densidade de ocupação. Isto ocorrerá uma vez que, ao diminuir a densidade de carga interna em 30%, menos calor será gerado no interior da edificação, menor será a carga térmica para resfriamento e o consumo com condicionamento do ar.

A incerteza referia-se às relações entre os parâmetros variáveis, principalmente no tocante ao desempenho térmico do uso do vidro insulado, a partir da mudança na densidade de ocupação. Entretanto, observou-se que os modelos com média densidade de ocupação tendem a seguir os mesmos padrões gerais do consumo global dos modelos com alta densidade. Dentre estes, as combinações de parâmetros de maior e menor consumos para cada cidade, a diferença de consumo entre modelos pares com vidro insulado e laminado, a relação do consumo e o percentual de abertura da fachada, e a relação de influência do fator solar e do tipo de vidro sobre a variação de consumo relacionado ao WWR. Estas relações são descritas no item 5.2.3.

Ao comparar-se a diferença percentual no consumo com resfriamento entre modelos com vidro insulado e com vidro laminado com alta densidade de ocupação às diferenças nos modelos com média densidade pode-se constatar que, apesar de seguirem o mesmo padrão, estes diferenciais podem ser ligeiramente acentuados.

No geral, estas diferenças percentuais de consumo entre os modelos com alta e média densidades de ocupação foi muito pequena. Para Porto Alegre, Florianópolis, Campo Grande e Salvador, esta diferença foi insignificante (menores que 1p.p.). Este comportamento é exemplificado por meio da Figura 88, a qual indica a diferença percentual de consumo energético para resfriamento comparando as duas densidades de ocupação para

Florianópolis. Quando a porcentagem é positiva, significa que o modelo de vidro insulado apresentou maior consumo.

Para Curitiba, Cuiabá, Recife, São Luís e Boa Vista, verificou-se diferença no consumo para resfriamento entre as diferentes densidades de ocupação de cerca de 1 p.p., sendo que, em todos os casos, os modelos com média densidade obtiveram maior disparidade entre modelos com vidro insulado e laminado do que os com alta densidade. Ilustrando este padrão, a Figura 89 apresenta os resultados para Curitiba.

Figura 88 - Gráfico de Diferença Percentual de Consumo para Resfriamento Comparando Média e Alta Densidade de Ocupação (Consumo Insulado – Consumo Laminado): **Porto Alegre**.

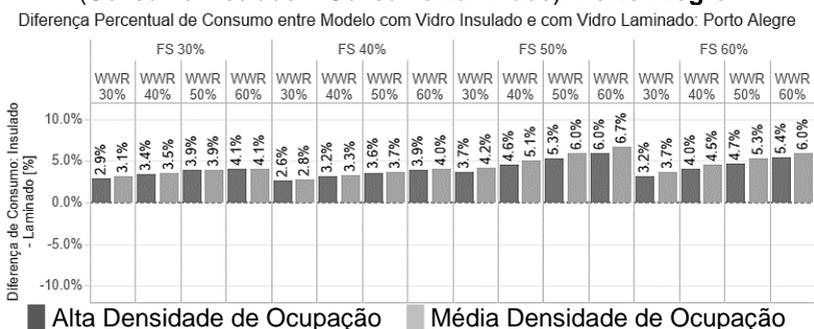
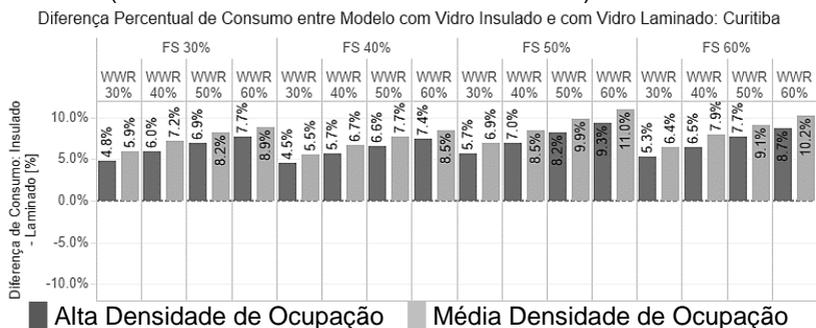


Figura 89 - Gráfico de Diferença Percentual de Consumo para Resfriamento Comparando Média e Alta Densidade de Ocupação (Consumo Insulado – Consumo Laminado): **Curitiba**.



Quanto à comparação entre o consumo energético global por área para resfriamento com o consumo para resfriamento das zonas térmicas limítrofes à envoltória da edificação, analisados no item 5.2.4, também pode ser constatada continuidade no padrão para as duas densidades de ocupação estudadas.

As relações diárias entre o consumo energético e a temperatura do ar externo, analisadas no item 5.2.2, também demonstram o mesmo comportamento nos períodos de verão e inverno para as duas densidades de ocupação. Tendo como exemplo, a Figura 90 e a Figura 91 evidenciam este comportamento para Cuiabá e Recife, respectivamente. Na primeira coluna observam-se as diferenças de consumo para o modelo de simulação com FS 30%, WWR 60% e alta densidade de ocupação. Ao lado, os resultados do modelo com mesmo FS e WWR, porém com média densidade de ocupação.

Nota-se que o padrão de diferenças entre o modelo de vidro insulado e o modelo de vidro laminado ao longo das semanas se mantém nas duas densidades de ocupação. Entretanto, as diferenças diárias de consumo são ligeiramente maiores entre os modelos com média densidade de ocupação do que entre os modelos com alta densidade de ocupação. Por exemplo, em Cuiabá durante o período de verão, a diferença máxima de consumo entre os modelos com vidro insulado e laminado foi de 22,4 kWh (0,018 kWh/m²) na alta densidade de ocupação e 25,4 kWh (0,020 kWh/m²) na média. Em Recife, durante o período de inverno, a diferença máxima foi de 7,4 kWh (0,006 kWh/m²) na alta densidade de ocupação e 9,4 kWh (0,007 kWh/m²) na média. Este mesmo comportamento ocorre em todas as cidades estudadas. Nos modelos de alta densidade, a carga térmica é dominada pelos ganhos internos, ao passo que os modelos com média densidade são mais afetados pela diferença de temperatura.

Figura 90 - Diferença de consumo com resfriamento: Laminado x Insulado. **Cuiabá**, FS 30% e WWR 60%. (a) Verão e Alta densidade de ocupação; (b) Inverno e Alta densidade de ocupação; (c) Verão e Média densidade de ocupação; (d) Inverno e Média densidade de ocupação.

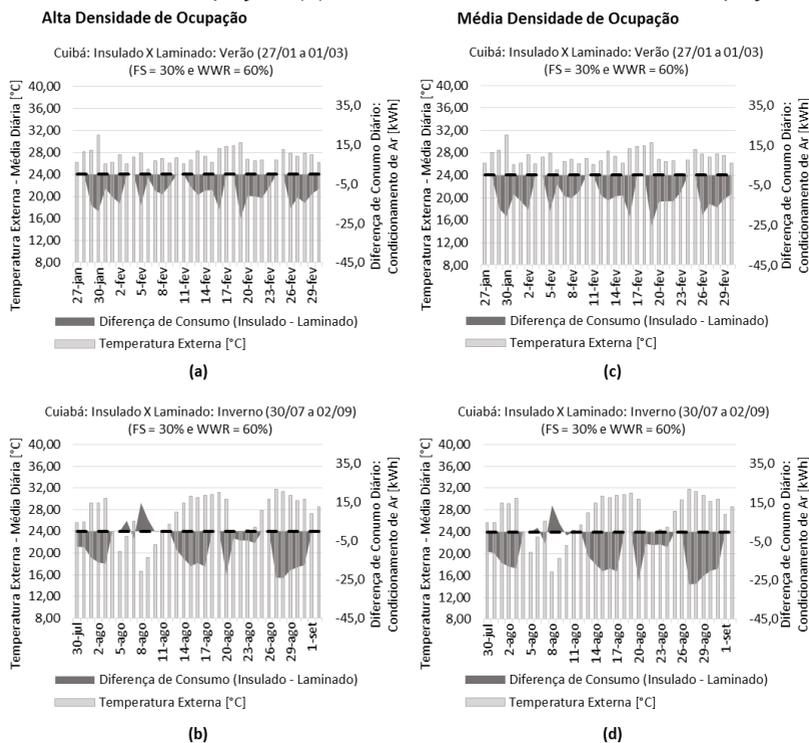
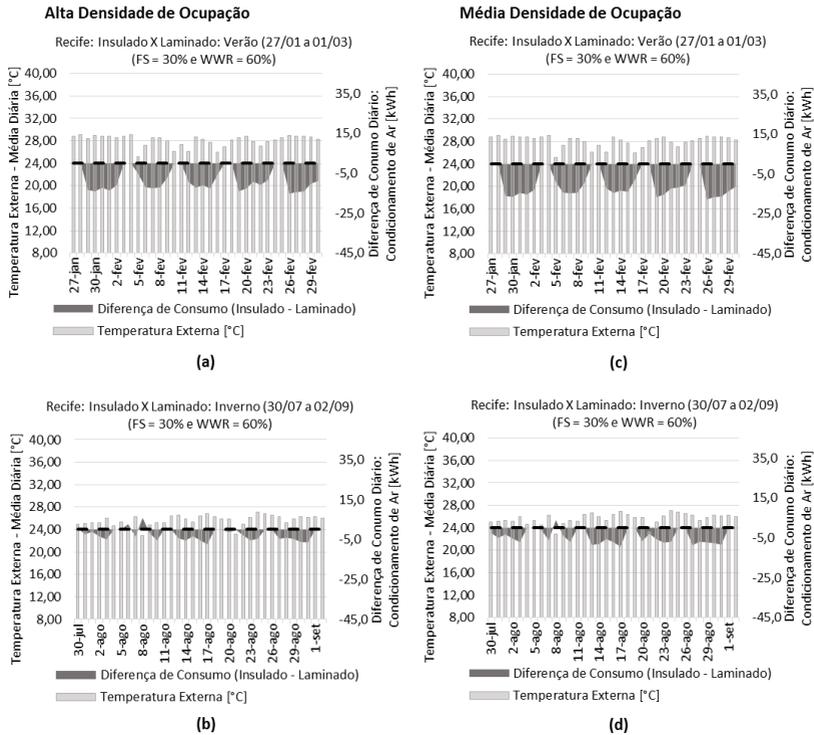


Figura 91 - Diferença de consumo com resfriamento: Laminado x Insulado. **Recife**, FS 30% e WWR 60%. (a) Verão e Alta densidade de ocupação; (b) Inverno e Alta densidade de ocupação; (c) Verão e Média densidade de ocupação; (d) Inverno e Média densidade de ocupação.



5.3 BALANÇO TÉRMICO

Investigou-se o balanço térmico para duas cidades brasileiras (Curitiba e Boa Vista) com o intuito de averiguar os efeitos de vidros insulados, em substituição a vidros laminados, nos fluxos de calor internos do modelo de edifício de escritórios estudado, com foco no fluxo pelas janelas. Optaram-se pelas cidades com maior e menor temperatura e radiação solar médias anuais, visando observar as situações opostas dentre os climas brasileiros apresentados. Selecionaram-se os pares de modelos (mesmos FS e WWR) com maior diferença de consumo para resfriamento do ar entre o uso de vidros insulados e vidros laminados. São os mesmos modelos utilizados para a análise de relação diária entre consumo energético e temperatura do ar externo (item 5.2.2). Primeiramente são apresentados apenas resultados referentes a modelos com alta densidade de ocupação.

Ressalta-se que o EnergyPlus possui algumas limitações em relação ao ganho de calor através dos vidros. A parcela da radiação que é conduzida através do vidro e então transmitida ao ambiente por convecção é exposta nesta análise como a parcela de contribuição da janela no balanço térmico. Entretanto, também há a parcela de radiação de ondas curtas que é transmitida diretamente às superfícies do ambiente. Os modelos deste estudo foram configurados com a opção de distribuição solar “*Full Exterior*”. Nesta, assume-se que toda radiação solar direta que ingressa na zona é direcionada para o piso, onde é absorvida de acordo com a absorptância solar do mesmo, conseqüentemente, a parcela de ganho de calor pelo piso no balanço térmico mostra-se elevada em todos modelos. A parcela refletida pelo piso é adicionada à radiação difusa transmitida, a qual assume-se como sendo uniformemente distribuída em todas superfícies internas. Estas superfícies aquecidas, por sua vez, propagam calor ao ar interno por meio de convecção. Deste modo, parte da contribuição de ganhos de calor pelas janelas no balanço térmico está distribuída às paredes, piso e cobertura. Infelizmente ainda não é possível rastrear o ganho total pelas janelas e trabalhou-se, portanto, com o ganho de calor por convecção.

Os gráficos expostos a seguir demonstram o balanço térmico nas zonas localizadas junto às fachadas. Representam-se os ganhos (valores positivos) e perdas (valores negativos) de

calor, em kWh. Consideraram-se os fluxos térmicos por convecção através das superfícies internas da zona térmica, como piso, paredes internas e externa, cobertura (neste caso o forro) e janela, a infiltração de ar externo, os ganhos internos (pessoas, iluminação e equipamentos) e o calor retirado pelo sistema de condicionamento de ar.

A Figura 92 expõem o balanço térmico, durante as semanas representativas de verão e de inverno, para Boa Vista. Comparam-se as contribuições do modelo com vidro insulado em relação ao modelo com vidro laminado. A Figura 93 demonstra esta mesma análise para o clima de Curitiba. Ao analisar-se a contribuição das fontes de calor no balanço térmico de cada zona nota-se, em termos gerais, que os ganhos internos representam a maior parcela de contribuição na demanda de condicionamento do ar.

Percebe-se que, apesar de a densidade de carga interna não ser um parâmetro variável entre estes modelos, os ganhos internos no balanço térmico demonstram grande oscilação. Esta ocorrência advém do cálculo do ganho de calor por convecção por pessoas executado pelo *EnergyPlus*. Entende-se que parte do calor gerado pelas fontes de calor interno será emitido ao ambiente por meio de radiação, que será distribuído entre as superfícies do ambiente; convecção, que será adicionado ao ar da zona; e evaporação (calor latente), que será controlado pelo sistema de ventilação. Para estabelecer as frações de ganho de calor sensível, composto pela parcela emitida por radiação e por convecção, e calor latente originados pelas pessoas, o *EnergyPlus* executa um cálculo complexo em função da taxa metabólica das pessoas e das condições ambientais, podendo variar de forma significativa. (DOE, 2016)

Em Boa Vista, o comportamento térmico deste modelo de edifício tende a manter as mesmas características ao longo do ano. Observam-se padrões semelhantes tanto entre os períodos de verão e de inverno, como também entre as orientações solares. Este resultado é esperado, pois a cidade apresenta temperaturas médias mensais com reduzida amplitude ao longo do ano (Figura 81, item 5.2.4). Além disso, a variação na incidência solar média anual entre as orientações é pequena, como visto anteriormente (Figura 86, item 5.2.4). Em Curitiba, entretanto, as diferenças de padrão nos fluxos de calor mostram-se significativas para inverno e verão, e razoáveis entre as orientações solares.

Figura 92 - Contribuição das fontes de calor no balanço térmico de uma semana representativa de **verão** (11 a 17/02) e uma de **inverno** (12 a 18/08), para **Boa Vista**, por orientação solar. Vidro insulado x Vidro laminado.

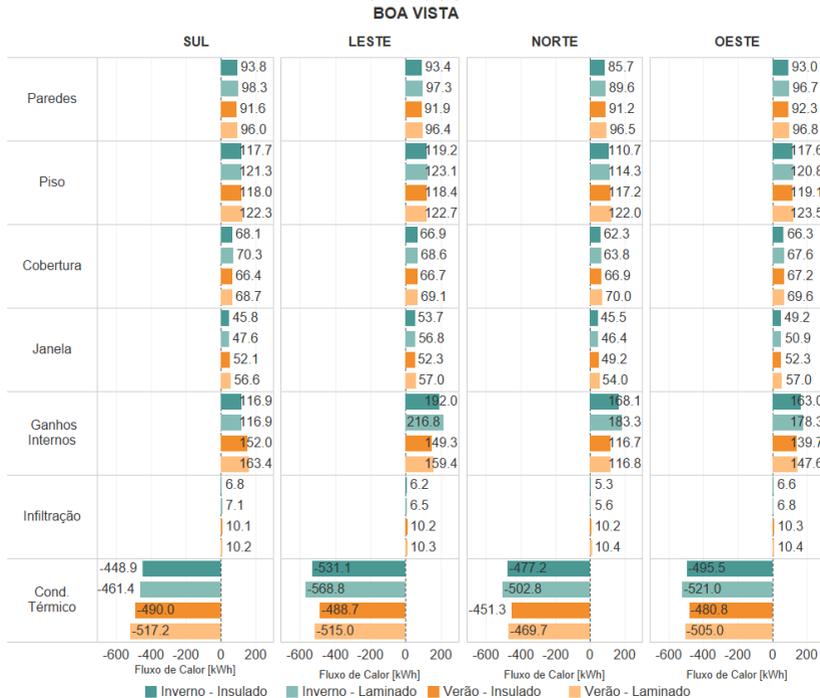
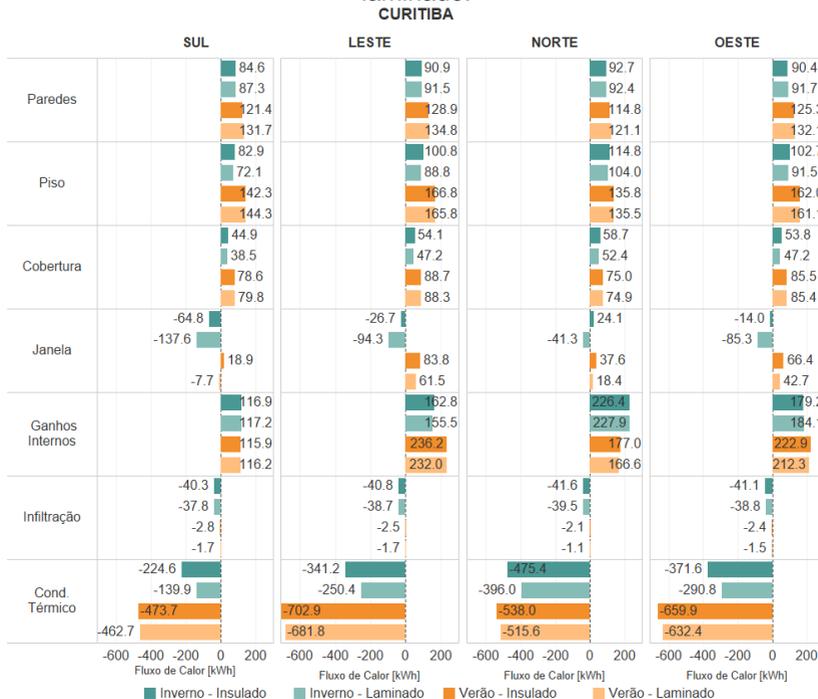
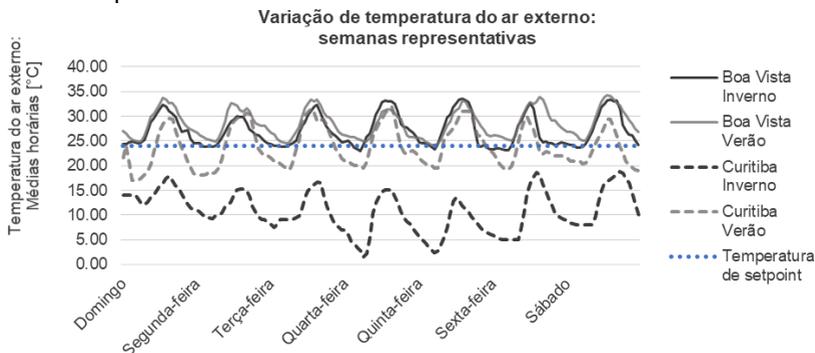


Figura 93 - Contribuição das fontes de calor no balanço térmico de uma semana representativa de **verão** (11 a 17/02) e uma de **inverno** (12 a 18/08), para **Curitiba**, por orientação solar. Vidro insulado x Vidro laminado.



A Figura 94 apresenta as temperaturas médias horárias ao longo das semanas representativas. No verão de Curitiba, apresenta-se potencial benéfico de dissipação do calor gerado durante o funcionamento do edifício, tanto pelas janelas como pela infiltração do ar externo. O balanço térmico de Boa Vista demonstra ganhos de calor pelas janelas e infiltração do ar em ambos períodos. Esta diferença ocorre, pois Curitiba possui maior amplitude térmica diária, com temperaturas próximas a 20°C durante a noite. O uso do vidro insulado apresenta menor potencial de resfriamento do edifício por dissipação através do vidro, devido a sua maior resistência térmica. Frisa-se que, em todas as situações estudadas, a demanda de resfriamento do ar durante o período de ocupação mantém-se por todo o ano.

Figura 94 - Variação da temperatura do ar externo durante as semanas representativas de verão e inverno: Boa Vista e Curitiba.



Em Boa Vista, o balanço térmico mostrou-se similar entre os modelos com vidros insulado e laminado. Nas quatro orientações solares e nos dois períodos do ano o uso do vidro insulado demonstrou barrar entre 2,1% e 8,7% mais o ganho de calor através das janelas. A economia na demanda para resfriamento verificou-se entre 2,7% e 6,6% quando utilizado o vidro insulado em relação ao vidro laminado.

Em Curitiba há diferenças significativas nos fluxos de calor através da janela, comparando o uso dos dois tipos de vidro. A orientação solar do ambiente também demonstrou influência no comportamento térmico das zonas. Mesmo durante o verão o modelo com vidro insulado demonstrou maior ganho de calor, sendo pouco maior que o dobro, na zona norte. Na zona sul, a diferença chegou a 2,5 vezes, onde o balanço do modelo com vidro insulado resultou em menor perda térmica através da janela e o modelo com vidro laminado permitiu a dissipação do calor.

Na semana de inverno evidencia-se a disparidade entre os dois tipos de vidro no fluxo de calor pelas janelas. O vidro laminado permite entre 110% e 510% a mais de potencial de dissipação comparado ao vidro insulado. Na zona térmica orientada para norte, o balanço através das janelas resulta em ganho térmico no modelo com vidro insulado e perda de calor no modelo com vidro laminado. Esta variação resultou na redução da demanda de condicionamento de ar entre 17,7%, na zona norte, e 37,7%, na zona sul, quando se utilizou o vidro laminado. Este efeito ocorre devido às diferenças de temperatura do ar entre o meio externo e

o ambiente interno. Para entendê-lo melhor, expõe-se a seguir o balanço térmico horário das quartas-feiras das semanas representativas de verão e inverno. Serão apresentados um número reduzido de gráficos exemplificando os resultados encontrados.

Os gráficos a seguir demonstram o balanço térmico horário de um dia representativo evidenciando os fluxos de calor no interior da zona térmica (barras empilhadas) relacionado às temperaturas médias horárias do ar interno, externo e de *setpoint* do ar-condicionado (linhas). As Figura 95, Figura 96, Figura 97 e Figura 98 demonstram o balanço térmico na zona térmica leste para a cidade de Boa Vista no dia representativo de inverno e de verão, considerando modelo com vidro insulado e com vidro laminado.

Observa-se que para o modelo de Boa vista não há diferença significativa (maior do que 0,50 kWh) no fluxo de calor horário pelas janelas, comparando o modelo com vidro insulado e com vidro laminado. Verifica-se tendência de que, durante o dia, o vidro insulado barre maior quantidade de calor contraposto ao vidro laminado. Ao passo que, à noite, quando não há ocupação e a diferença de temperatura entre o ar exterior e interior diminui, o vidro laminado permite melhor dissipação do calor. Entretanto estas diferenças são expressas em valores muito baixos, entre 0,01 e 0,48 kWh, portanto não se pode considerar que os fluxos de calor através das janelas sejam consideravelmente diferentes entre estes vidros. Este mesmo padrão ocorre para todas orientações solares e nos períodos de verão e inverno.

Figura 95 - Balanço térmico do dia representativo de inverno: Vidro insulado; Leste; Boa Vista. Alta densidade de ocupação.

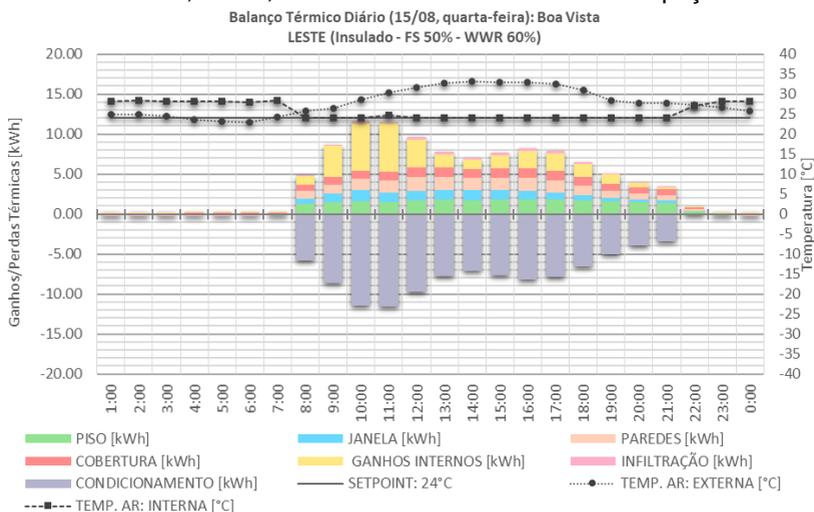


Figura 96 - Balanço térmico do dia representativo de inverno: Vidro laminado; Leste; Boa Vista. Alta densidade de ocupação.

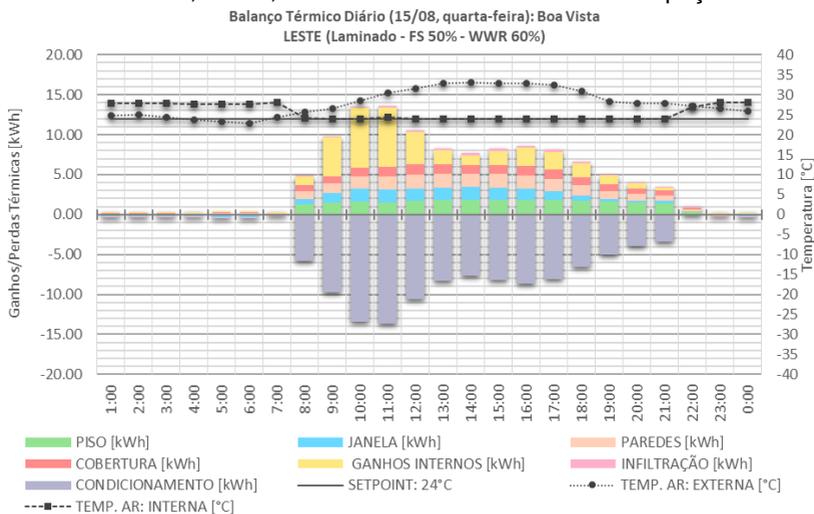


Figura 97 - Balanço térmico do dia representativo de verão: Vidro **insulado**; Leste; Boa Vista. Alta densidade de ocupação.

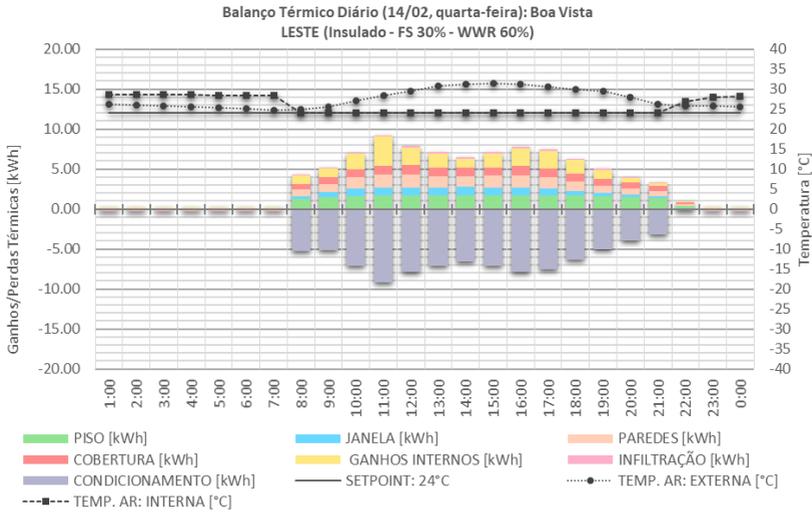
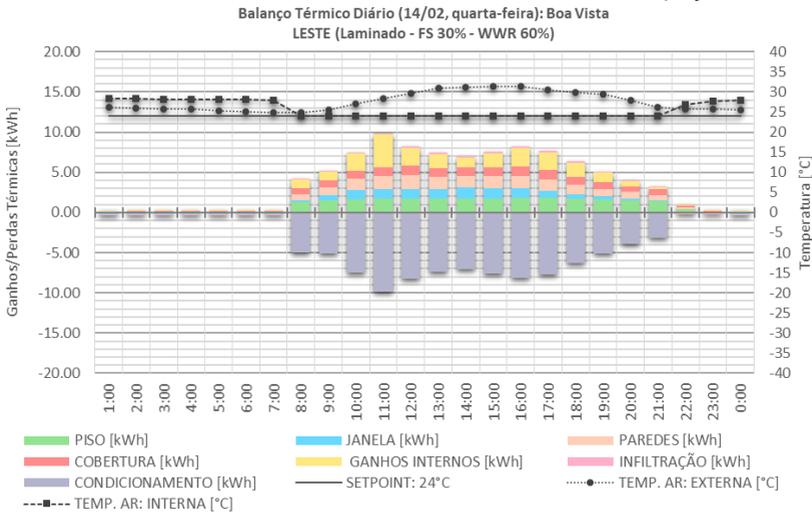


Figura 98 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro **laminado**; Leste; Boa Vista. Alta densidade de ocupação.



Durante o verão de Curitiba, verifica-se comportamento semelhante a Boa Vista, em que não há diferença significativa no fluxo horário através das janelas comparando os dois tipos de vidro. Contudo, o vidro laminado tende a permitir maior perda ou menor balanço de calor durante todo dia, com exceção aos horários de pico de radiação na fachada leste (entre 9:00 e 12:00 horas), na fachada norte (entre 11:00 e 16:00 horas) e na fachada oeste (entre 14:00 e 17:00 horas). Frisa-se que, como ocorre para Boa Vista, nestes casos a comparação entre os resultados utilizando o vidro insulado e o vidro laminado não podem ser considerados significativamente distintos. A Figura 99 e a Figura 100 exemplificam os resultados para este período.

De maneira oposta, durante o dia de inverno de Curitiba percebe-se diferença significativa no fluxo de calor pelas janelas entre os modelos com diferentes tipos de vidro, como pode ser aferido na Figura 101 e na Figura 102. Em todo período o vidro laminado apresentou menor balanço de calor durante os horários de pico de incidência de radiação nas fachadas, ou seja, pela manhã na fachada leste, no início da tarde na fachada norte e ao fim da tarde na fachada oeste. Entende-se que, nestes períodos, o vidro laminado permitiu maior dissipação de calor do que o fluxo oposto, resultando em um balanço positivo (ganho de calor) menor do que o modelo com vidro insulado.

Nos demais horários o uso do vidro laminado possibilitou dissipação de calor significativamente maior comparado ao vidro insulado, com contraste na perda de calor entre 0,13 e 0,73 kWh a cada hora. A dissipação do calor gerado no interior da edificação ocorre de forma mais efetiva ao longo da noite (entre 18:00 e 6:00 horas). Neste período, enquanto a perda total de calor pela fachada (soma das quatro orientações) é de 28,4 kWh no modelo com vidro insulado, ao utilizar o vidro laminado a perda pela fachada é 94% maior (55,2 kWh).

Observa-se que, mesmo em um dia com temperaturas médias horárias muito abaixo do *setpoint* de aquecimento (20°C), há necessidade de resfriamento do ar durante a maior parte do período de ocupação. Comparando-se a temperatura no interior do ambiente com a temperatura externa, a diferença horária de temperatura chega a 19,8 °C. Este fato ocorre devido ao modelo de edificação considerado, em que não há presença de ventilação

natural como um mecanismo de dissipação da carga interna. Nestes casos o efeito estufa é potencializado.

Figura 99 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro **insulado**; Norte; Curitiba. Alta densidade de ocupação.

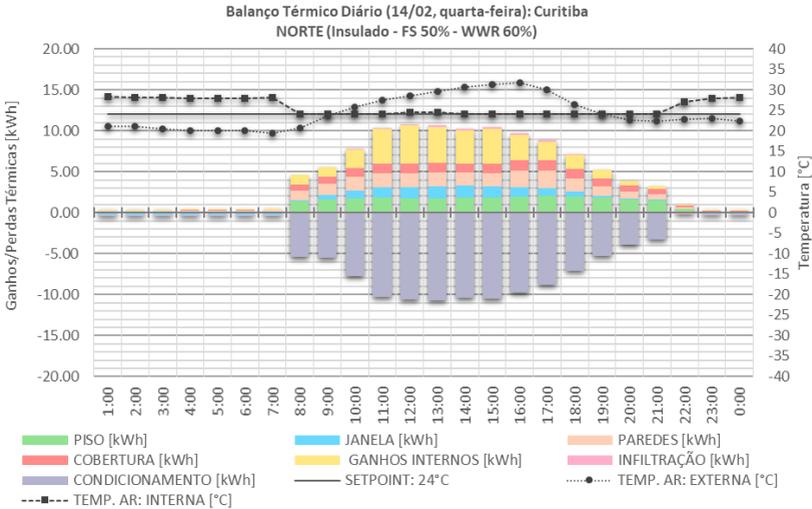


Figura 100 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro **laminado**; Norte; Curitiba. Alta densidade de ocupação.

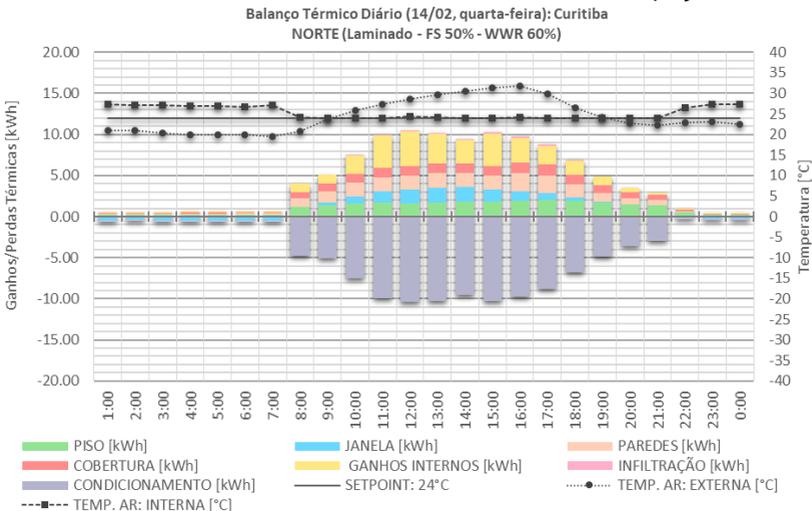


Figura 101 - Balanço térmico do dia representativo de inverno. Vidro insulado; Oeste; Curitiba. Alta densidade de ocupação.

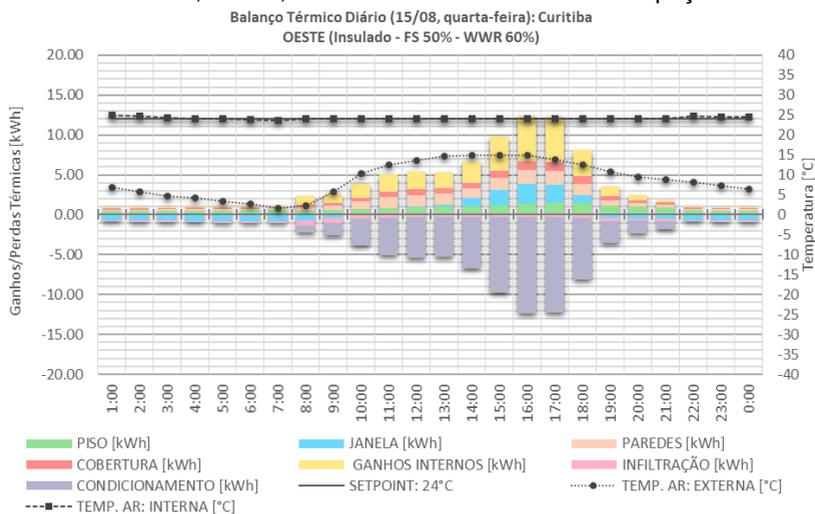
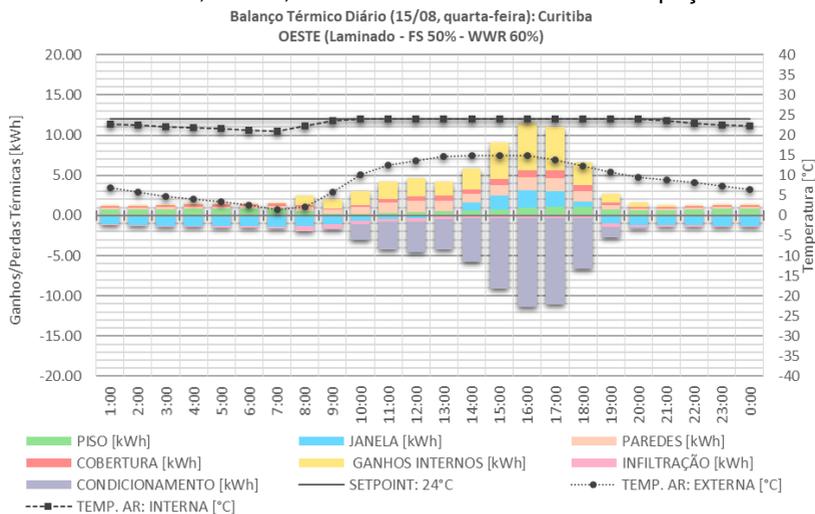


Figura 102 - Balanço térmico do dia representativo de inverno. Vidro laminado; Oeste; Curitiba. Alta densidade de ocupação.



Como pode ser verificado na Figura 103 e na Figura 104, a orientação sul permite perda de calor no decorrer de todo o dia, pois apresenta a soma de dois fatores que colaboram com esta dissipação: a baixa incidência de radiação solar; e a diferença de temperatura entre o interior e o exterior. Em Curitiba, a média anual de radiação solar incidente na fachada sul é cerca de 50% da radiação incidente nas demais fachadas, como pode ser constatado na Figura 105. Por conseguinte, a parcela do fluxo térmico pelas janelas correspondente à radiação solar será consideravelmente menor na fachada sul.

O segundo aspecto acontece para todas orientações solares. Há elevada carga interna gerada no interior do pavimento, o que gera necessidade de resfriamento durante todo período de ocupação. O vidro insulado possui maior resistência térmica, impedindo que o calor seja dissipado para o exterior através das janelas. Esta dispersão de calor para o exterior da edificação contribui para minimizar a demanda de resfriamento do ar e, consequentemente, o consumo de energia elétrica.

Figura 103 - Balanço térmico do dia representativo de inverno. Vidro insulado; Sul; Curitiba. Alta densidade de ocupação.

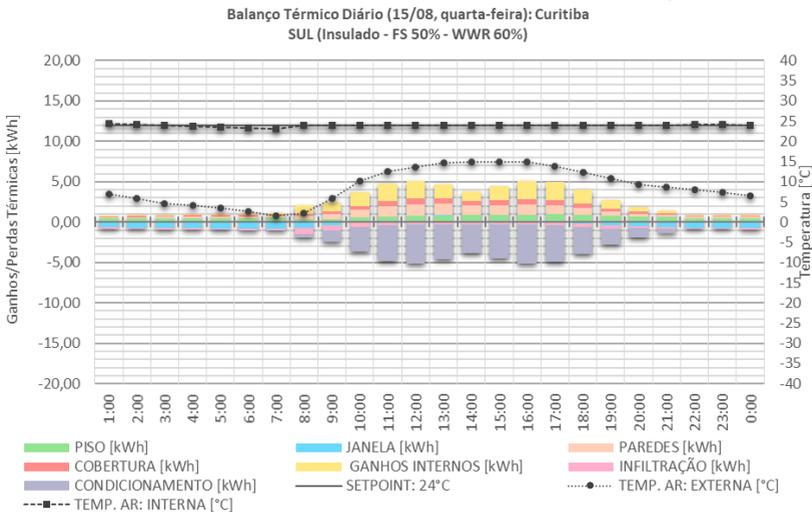


Figura 104 - Balanço térmico do dia representativo de inverno. Vidro laminado; Sul; Curitiba. Alta densidade de ocupação.

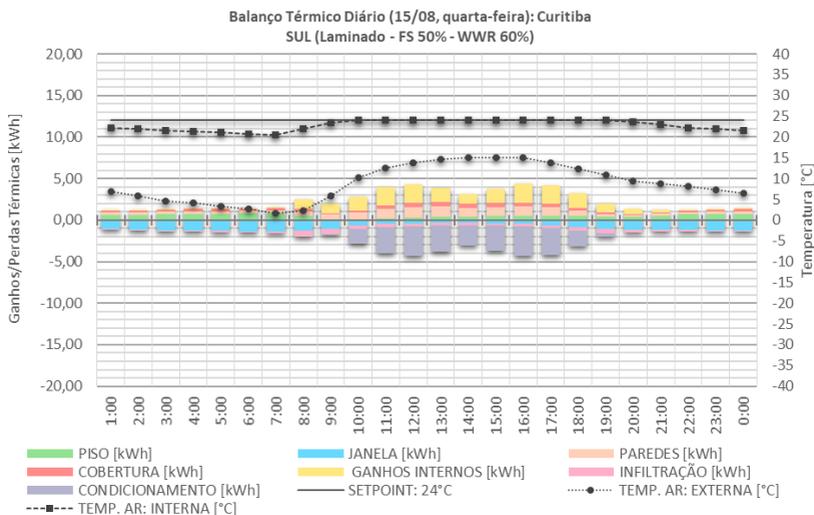
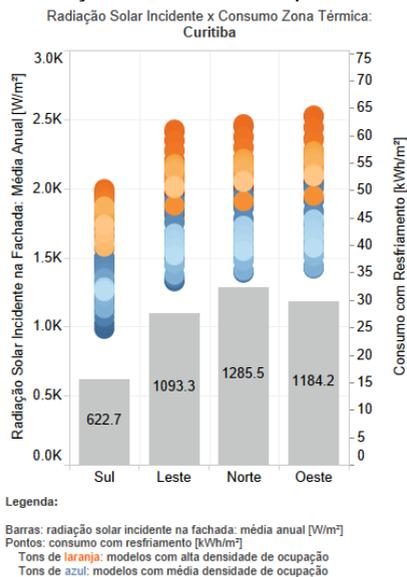


Figura 105 - Relação entre consumo para resfriamento nas zonas térmicas e a radiação solar incidente por fachada: Curitiba.



Quando se compara o balanço térmico diário dos modelos com alta densidade de ocupação aos modelos com média densidade de ocupação, identificam-se os mesmos padrões descritos anteriormente. Para Boa Vista (Figura 106, Figura 107, Figura 108 e Figura 109), a diferença no fluxo de calor pelas janelas foi ligeiramente maior nos modelos com média densidade de ocupação. O vidro insulado apresentou melhor potencial de barrar o calor, entretanto a discrepância entre as densidades de ocupação foi irrisória, sendo menor do que 1,6 kWh por dia, considerando as quatro zonas térmicas.

Ao contrário do que ocorre em Boa Vista, em Curitiba (Figura 110, Figura 111, Figura 112 e Figura 113) observa-se que a diferença no fluxo de calor através das janelas é menor entre os modelos com média densidade de ocupação. Neste caso, o vidro laminado dissipou menos calor comparativamente do que os modelos com alta densidade de ocupação. Para esta cidade a discrepância entre as densidades de ocupação também se mostrou reduzida, sendo abaixo de 2,4 kWh por dia, somando-se as quatro orientações solares.

Reduzindo-se a densidade de ocupação dos ambientes, menos calor será gerado em seu interior e menor será a demanda de carga térmica do sistema de condicionamento de ar. Portanto, a necessidade de dissipação do calor será menor. Entretanto, os ganhos com ocupação ainda assim coincidem com o período de maiores ganhos por radiação e por diferença de temperatura, por esta razão, a variação na densidade de ocupação não gerou diferença significativa no fluxo de calor através das janelas.

Figura 106 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro insulado; Norte; Boa Vista. Alta densidade de ocupação.

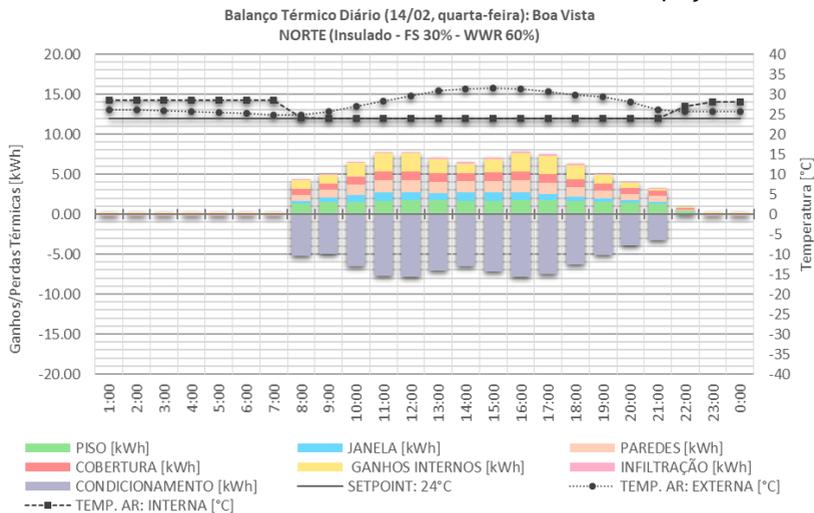


Figura 107 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro laminado; Norte; Boa Vista. Alta densidade de ocupação.

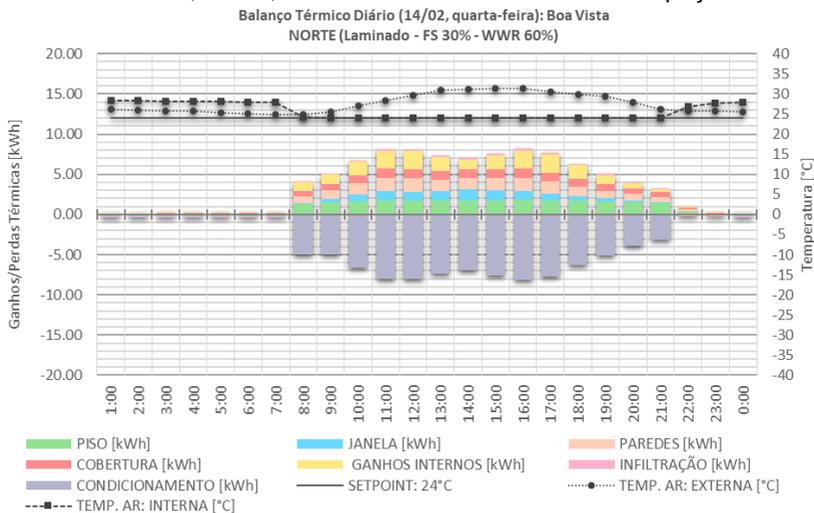


Figura 108 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro **insulado**; **Norte**; **Boa Vista**. Média densidade de ocupação.

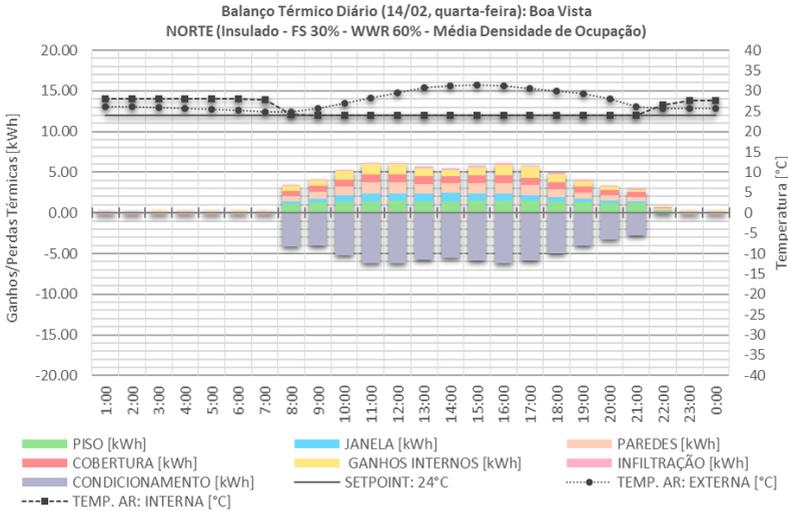


Figura 109 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro **laminado**; **Norte**; **Boa Vista**. Média densidade de ocupação.

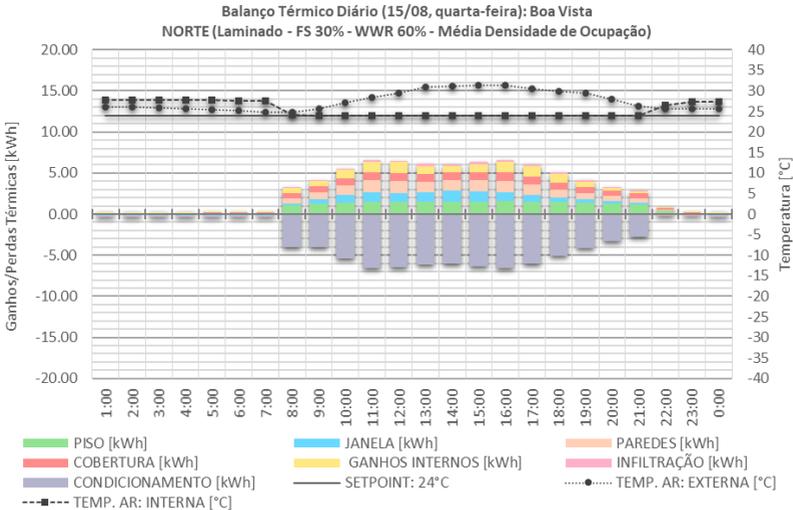


Figura 110 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro insulado; Leste; Curitiba. Alta densidade de ocupação.

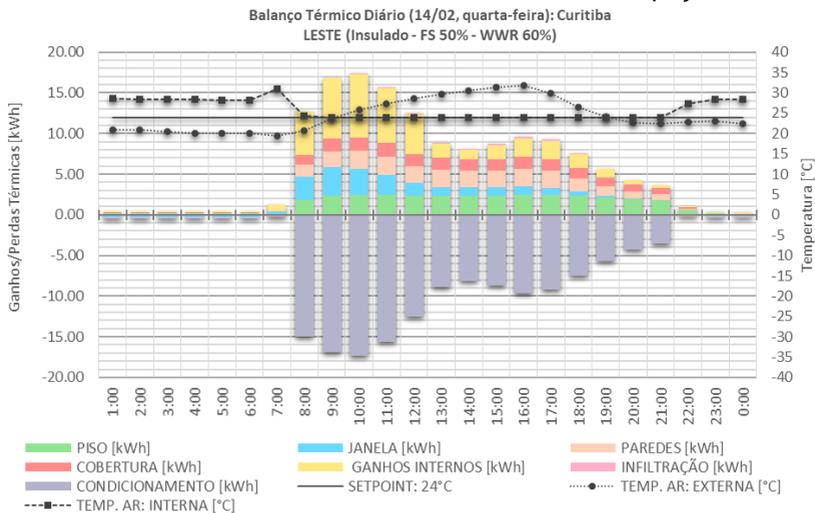


Figura 111 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro laminado; Leste; Curitiba. Alta densidade de ocupação

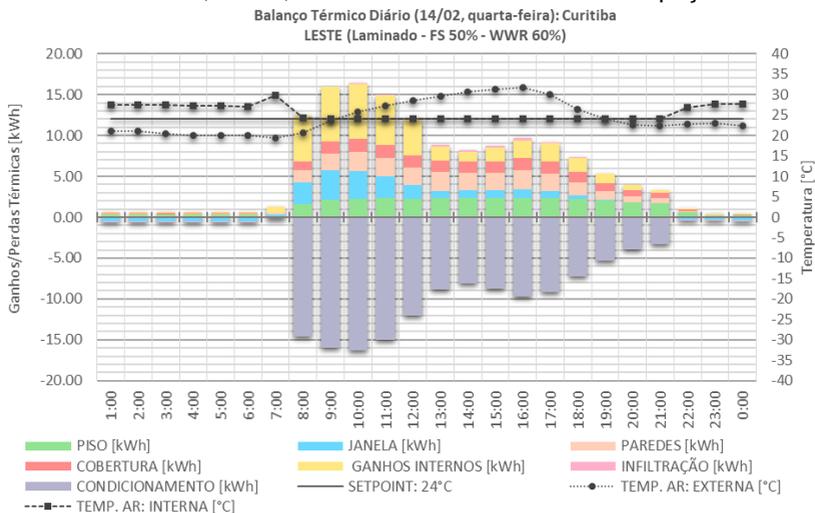


Figura 112 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro **insulado**; **Leste**; **Curitiba**. Média densidade de ocupação.

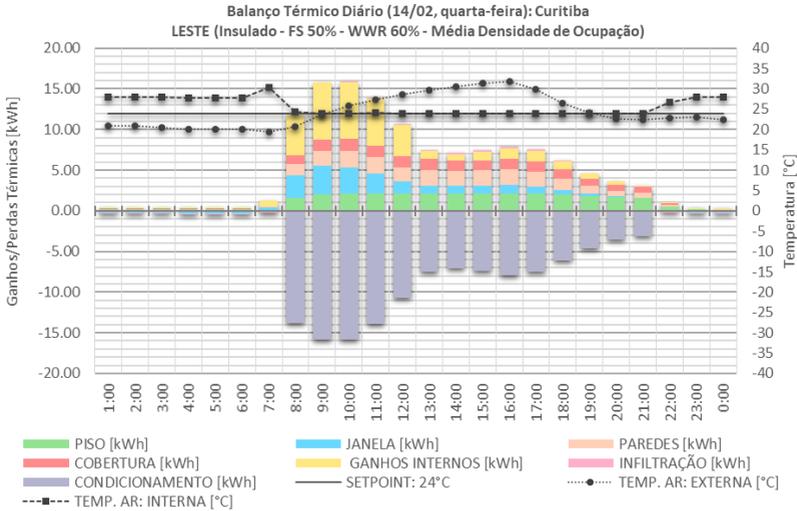
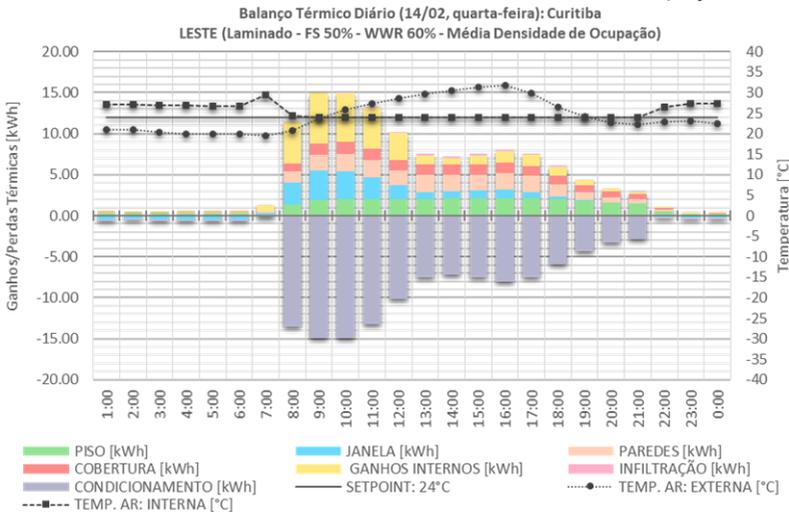


Figura 113 - Balanço térmico do dia representativo de verão. Vidro **laminado**; **Leste**; **Curitiba**. Média densidade de ocupação.



6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apontam-se as conclusões obtidas com base nos resultados e reflexões alcançados neste estudo. Ademais, apresentam-se as considerações finais, as limitações desta pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como principal foco a análise de desempenho energético de edifícios de escritórios localizados no Brasil com uso de vidros insulados. As estimativas de consumo de energia elétrica foram obtidas por meio de simulação computacional de desempenho termo energético de edificações, utilizando o *software EnergyPlus*.

Definiu-se um modelo de pavimento típico de edifícios de escritórios de planta aberta e condicionado artificialmente, comparando o uso do vidro insulado ao uso de vidros laminados. Além do tipo de vidro, estabeleceram-se outros três parâmetros variáveis: o fator solar do vidro, o percentual de abertura da fachada e a densidade de ocupação do escritório. Avaliaram-se nove cidades brasileiras de forma a abranger da melhor forma possível os diferentes climas encontrados no Brasil. São elas: Porto Alegre, Florianópolis, Curitiba, Campo Grande, Cuiabá, Salvador, Recife, São Luís e Boa Vista.

6.1.1 Desempenho termo energético

Fundamentando-se nos resultados de consumo energético para condicionamento térmico, não se justifica o uso de vidros insulados em prédios de escritórios, em planta aberta e com condicionamento artificial do ar, na região sul do Brasil (clima temperado). Para Porto Alegre, Florianópolis e Curitiba, os modelos com vidro insulado obtiveram consumo energético em condicionamento do ar entre 2,1% e 11,0% maior, comparado ao uso de vidro não insulados. Campo Grande, por sua vez, apresentou oscilação entre os cenários, porém com diferenças entre os modelos com diferentes tipos de vidros próximas a zero. A região mais a norte do Brasil, com latitudes abaixo de 20° aproximadamente, o uso de vidro insulado demonstra certa

vantagem, entretanto a economia anual prevista foi de no máximo 3,6%. Predominam as situações em que a economia gerada pode ser desconsiderada.

Ao investigar a demanda diária em condicionamento de ar relacionada ao clima local, observou-se que quanto menor for a diferença entre a temperatura externa do ar e a temperatura no interior da edificação, neste estudo mantida pelo sistema de condicionamento térmico entre 20°C e 24°C, menor será a influência da transmitância térmica do vidro no desempenho energético da edificação.

Curitiba, cidade que apresentou maior disparidade entre a temperatura interna e externa ao longo de todo ano, obteve diferenças máximas diárias entre os tipos de vidro de 26,5 kWh, no verão, e 41,9 kWh, no inverno. Em Porto Alegre e Florianópolis, também apresentou elevada diferença diária no período de inverno, alcançando 35,3 kWh, porém no verão esta disparidade é bastante reduzida, chegando a 12,6 kWh por dia. Campo Grande apresentou o mesmo padrão do verão de Porto Alegre e Florianópolis durante todo ano. Nestas quatro cidades o consumo com condicionamento do ar para os modelos com vidro insulado manteve-se mais elevado do que nos modelos com sistema de vidros não insulado.

Entende-se que estas relações ocorrem devido ao isolamento térmico gerado pela câmara de ar presente na composição de vidros insulados. Com temperaturas predominantemente abaixo da temperatura mantida pelo sistema de condicionamento de ar, o vidro laminado permite que o modelo dissipe mais facilmente as altas cargas térmicas internas geradas neste tipo de edificação, ao passo que, possuindo maior resistência térmica, o vidro insulado dificulta esta transferência de calor por condução, ocasionando um efeito estufa. Em climas muito rigorosos, com temperaturas do ar abaixo de zero, este bloqueio torna-se uma vantagem, gerando economia no consumo com aquecimento do ar.

Em contrapartida, em climas com temperaturas médias diárias acima do *setpoint* de resfriamento, a baixa transmitância térmica do vidro insulado (aproximadamente metade em relação ao vidro laminado), bloqueia a entrada de calor externo a ser acrescido às cargas térmicas internas. O vidro laminado permite maior transmissão deste calor, sobrecarregando o sistema de

condicionamento de ar. Quando a temperatura do ar externo se aproxima à temperatura interna mantida pelo sistema de condicionamento de ar, a transmitância térmica do vidro terá pouca influência no desempenho térmico da edificação.

Ao observar-se as relações na variação do fator solar, percentual de abertura da fachada e tipo de vidro empregado com o consumo energético com resfriamento previsto para cada cidade, conclui-se que em cidades de clima temperado, com temperatura do ar e incidência de radiação solar médias anuais mais baixas, como Porto Alegre, Florianópolis e Curitiba, a influência das variações nas aberturas da edificação tende a ser maior do que nas cidades com temperaturas e radiação superiores.

Ademais, constata-se que, apesar de se esperar que o consumo dos modelos com mesmo vidro aumente conforme amplia-se o percentual de abertura da fachada, em climas mais amenos (Porto Alegre, Florianópolis e Curitiba) não há variação significativa no consumo energético para resfriamento entre os diferentes percentuais de abertura da fachada, quando utiliza-se vidro de fator solar baixo (30% e 40%). Em contrapartida, para as cidades com temperaturas mais altas, como Campo Grande, Cuiabá, Salvador, Recife, São Luís e Boa Vista, a hipótese inicial se aplica integralmente. Além disso, verificou-se que quanto menor o fator solar do vidro, menor é a influência do WWR no consumo para resfriamento.

Ao comparar-se o comportamento térmico das zonas térmicas localizadas junto às fachadas da edificação voltadas para diferentes orientações solares, concluiu-se que ao contrário do que se esperava, não foi possível encontrar uma combinação “ideal” de fatores diferenciada para cada orientação. Portanto, entende-se que, para as condições aqui simuladas (uso de persianas internas, mesma área de janela em todas orientações, mesmo tamanho e configurações de uso para todas as zonas térmicas), a relação entre a temperatura do ar externo e a temperatura mantida no ambiente interno terá um papel mais significativo na praticabilidade do uso de vidros do tipo insulado nos climas brasileiros do que o ganho térmico por radiação solar.

Isto ocorre pelo fato de a principal característica de distinção entre composições de vidros insulados e outras composições de vidros, que também possuem o intuito de melhorar o desempenho

térmico de edificações, ser o aumento no isolamento térmico (menor transmitância térmica) da envoltória, o que diminui a influência do ambiente externo no interior do edifício, mas também dificulta a dissipação da alta carga térmica interna (ondas curtas) por condução através do vidro.

Indiscutivelmente, modificando-se a densidade de ocupação, o consumo em condicionamento de ar do edifício será influenciado de forma efetiva, porém as relações de viabilidade do uso de vidros insulados, relativo ao seu desempenho térmico, não se alteram. Ao reduzir o calor gerado no interior da edificação, a diferença entre o consumo energético para resfriamento entre modelos com vidro insulado e vidro laminado tende a acentuar-se.

Fundamentando-se nestas análises, entende-se que a variação na densidade de ocupação de ambientes de escritórios não será um fator determinante na viabilidade do uso de vidros insulados para edificações com estas funções e condições aqui simuladas. O fato de a geração de carga interna coincidir com o período de ganho de calor externo por radiação solar e por condução por diferença de temperatura é o que torna a ocupação em escritórios um agente decisivo na escolha do tipo de vidro adequado.

Outro fator constatado a partir das simulações realizadas é que, mesmo com carga de equipamentos e quantidade de pessoas classificada pela norma como densidade de ocupação média, escritórios geram carga interna tal que é necessário manter o sistema de condicionamento resfriando os ambientes mesmo durante dias com temperaturas do ar externo mais baixas. Além disso, o período de funcionamento dos escritórios tende a coincidir com os intervalos de temperaturas mais elevadas e maior ganho de radiação solar durante o dia.

6.1.2 Balanço Térmico

As análises de balanço térmico ratificam os diagnósticos anteriores para esta tipologia de edifício. Mesmo em climas quentes, se há amplitude térmica diária e redução significativa da temperatura durante a noite, com temperaturas abaixo do *setpoint* de resfriamento do sistema de condicionamento de ar, há maior potencial de dissipação do calor gerado durante o funcionamento

do edifício. Este potencial é reduzido quando se utiliza vidro insulado, devido a sua resistência térmica mais elevada.

Em situações em que a temperatura externa mantém-se superior à temperatura do ambiente durante o período de ocupação, o vidro insulado auxilia na atenuação dos efeitos do meio externo no interior da edificação, barrando uma parcela maior do fluxo de calor no sentido exterior-interior. Entretanto, o isolamento térmico criado pela câmara de ar também impede o fluxo de calor no sentido oposto (interior-exterior), mesmo durante a noite, onde as temperaturas costumam ser mais baixas do que a temperatura no interior do edifício. Isto impede a dissipação do calor gerado no interior do ambiente durante a sua ocupação. Esta perda de calor seria benéfica, pois significaria menos carga térmica para o sistema de climatização retirar ao início do próximo dia ou semana.

Quando a temperatura do ar externo permanece abaixo do *setpoint* de resfriamento do ar-condicionado, o vidro não insulado permite dissipação do calor gerado por pessoas, equipamentos e iluminação também durante parcela expressiva do período de ocupação da edificação. Esta possibilidade reduz a carga térmica total do sistema de condicionamento térmico de forma significativa. Esta dissipação torna-se ainda mais efetiva no período da noite. Observou-se, para Curitiba, que o uso do vidro laminado em substituição ao vidro insulado permite perda de calor através da fachada até 94% (55,2 kWh) maior, entre 18h e 6h.

6.1.3 Conclusões Gerais

A radiação solar é, indiscutivelmente, umas das principais e mais efetivas fontes de ganho de calor proveniente do meio externo à edificação, entretanto não é um dos fatores climáticos mais relevantes na viabilidade do uso de vidros insulados. Sendo o isolamento térmico a característica mais expressiva deste tipo de composição, o nível de discrepância entre a temperatura do ar externo e a temperatura mantida no ambiente pelo sistema de condicionamento de ar tem papel determinante no desempenho térmico de vidros insulados em escritórios.

Observando as análises realizadas entende-se que mesmo em localidades em que os modelos com vidro insulado apresentaram menor consumo energético para condicionamento

do ar, comparado aos modelos com vidro sem câmara de ar, esta economia provavelmente não será suficiente para tornar sua implementação viável economicamente. Isto porque o investimento necessário para o emprego de vidros insulados é muito superior ao uso de vidros laminados, por possuir maior demanda e custo na quantidade de vidro e de esquadria.

Por fim, pôde-se concluir que apesar de os vidros insulados serem amplamente utilizados em climas rigorosos devido ao isolamento térmico que proporcionam, a partir da amostra observada, compreende-se que o uso de vidros insulados em edificações de escritórios de planta aberta, condicionados artificialmente e de funcionamento predominantemente diurno, não é adequado para os climas brasileiros, quando considera-se o desempenho térmico destas edificações.

Cabe salientar que as conclusões se aplicam apenas ao modelo de edificação de escritórios aqui simulado, frisando-se a distribuição dos escritórios em planta aberta, com persianas internas de média refletância solar, porém sem sombreamento externo, e a não consideração de um entorno edificado.

6.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.2.1 Limitações da Pesquisa

As limitações desta pesquisa estão atreladas principalmente ao recorte necessário, tais como:

a. Limitou-se a apenas uma tipologia arquitetônica com distribuição dos escritórios em planta aberta. Outras tipologias de escritórios podem apresentar resultados divergentes;

b. Por simular apenas modelos condicionados artificialmente, não se avaliou a atuação da ventilação natural e mista no desempenho de escritórios com o emprego de vidros insulados;

c. Não se considerou a possibilidade de sombreamento externo devido às condições de entorno. Este fator poderia influenciar nos resultados das simulações;

d. Não se estudou a relação viabilidade do uso de vidros insulados integrada a possibilidades de sombreamento externo da fachada;

e. Concentrou-se na análise de consumo de energia para climatização, sem avaliar a melhoria no conforto térmico interno que o sistema insulado pode proporcionar devido à redução de temperatura superficial do vidro, mesmo quando exposto à radiação solar.

f. Trata apenas do desempenho térmico dos vidros, não atentando às vantagens que o uso de vidros insulados poderia proporcionar no desempenho luminoso e acústico em edifícios de escritórios.

6.2.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

De forma complementar a esta pesquisa, sugerem-se trabalhos futuros, considerando os climas brasileiros, que abrangessem:

a. Esta verificação para outras tipologias de edifícios de escritórios;

b. A avaliação do conforto térmico proporcionado pelos vidros insulados em áreas próximas à janela;

c. A análise quanto ao desempenho e conforto luminoso considerando o uso de vidros insulados;

d. O estudo de viabilidade econômica do uso de vidros insulados a partir da economia de energia elétrica gerada, quando pertinente.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE/IESNA STANDARD 90.1**: Energy Standard for Building Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta, GA: ASHRAE, 2007. 188 p.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **HANDBOOK - FUNDAMENTALS**: Chapter 15 - Fenestration. Atlanta: ANSI/ASHRAE, 2009. 62p.

ANDREIS, Chíntia. **Influência de fachadas envidraçadas no consumo de energia de um edifício de escritórios em diferentes cidades brasileiras**. 2014. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/129677>>. Acesso em: 03 mar. 2016.

ANDREIS, Chíntia; BESEN, Priscila; WESTPHAL, Fernando Simon. Desempenho Energético De Fachadas Envidraçadas Em Climas Brasileiros. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15, 2014, Maceió, AL. **Anais**. Maceió, AL: ANTAC, 2014. p.926 - 935. Disponível em: <<http://doi.org/10.17012/entac2014.628>>. Acesso em: 29 mar. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-2**: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-3**: Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.401-1**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos das instalações. Rio de Janeiro: ABNT, 2008a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.401-2**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008b. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.401-3**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2008c. 24 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.023**: Vidros revestidos para controle solar – requisitos, classificação e métodos para ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.015**: Vidro insulado — Características, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 52 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7199**: Vidros na construção civil — Projeto, execução e aplicações. Rio de Janeiro: Abnt, 2016. 57 p.

BATISTA, Juliana Oliveira; LAMBERTS, Roberto; WESTPHAL, Fernando Simon. Avaliação de desempenho térmico de componentes construtivos utilizando o EnergyPlus. In: XIII ENCONTRO NACIONAL E IV LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC/ELACAC), 2005, Maceió, AL. **Anais**. Maceió, AL: Antac, 2005. p. 145 - 154.

BATISTA, Juliana Oliveira. **Eficácia da Ventilação Mecânica Noturna para Resfriamento: Impacto de Estratégias Híbridas de Ventilação no Desempenho Térmico de Residência em Florianópolis - SC**. 2011. 286 f. Tese (Doutorado) - Curso de

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/95136?show=full>>. Acesso em: 25 ago. 2016.

BESEN, Priscila; WESTPHAL, Fernando Simon. Uso de vidro duplo e vidro laminado no brasil: avaliação do desempenho energético e conforto térmico por meio de simulação computacional. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14, 2012, Juiz de Fora, MG. **Anais**. Juiz de Fora, MG: ANTAC, 2012. p.2820 - 2826.

BESEN, Priscila; WESTPHAL, Fernando Simon. Fachadas de vidro no brasil: um estudo comparativo de viabilidade econômica. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15. 2014, Maceió, AL. **Anais**. Maceió, AL: ANTAC, 2014. p.964 - 973.

BRANDALISE, Mariane Pinto. **Análise da Sensibilidade do RTQ-C Quanto à Variação da Densidade de Carga Interna**. 2015. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas.

CARVALHO, M. M. Q.; ROVERE, E. L.; GONÇALVES, A. C. M. Analysis of variables that influence electric energy consumption in commercial buildings in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 14, n. 9, p.3199-3205, dez. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.009>.

DIDONÉ, E. L.; WAGNER, A.; PEREIRA, F. O. R. Estratégias para edifícios de escritórios energia zero no Brasil com ênfase em BIPV. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 27-42, jul./set. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

JABER, Samar; AJIB, Salman. Thermal and economic windows design for different climate zones. **Energy and Buildings**, v. 43,

n. 11, p.3208-3215, nov. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.019>.

HUANG, Yu; NIU, Jian-lei; CHUNG, Tse-ming. Comprehensive analysis on thermal and daylighting performance of glazing and shading designs on office building envelope in cooling-dominant climates. **Applied Energy**, [s.l.], v.134, p.215-228, dez.2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.100>.

HUANG, Yu; NIU, Jian-lei. Energy and visual performance of the silica aerogel glazing system in commercial buildings of Hong Kong. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 94, p.57-72, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.053>.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Anexo Geral V**: Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros. Anexo da Portaria INMETRO Nº 50/2013. Rio de Janeiro: INMETRO, 2013a.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Requisitos técnicos da qualidade para o nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos**: RTQ-C. Rio de Janeiro: INMETRO, 2013b.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 7730**: Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. 3 ed. Suíça: ISO, 2005. 52 p.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Global atlas**. IRENA. Disponível em: <http://globalatlas.irena.org/> Acesso em: janeiro de 2017.

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. **WINDOW** v. 7.4. Berkley: LBNL, 2016. Disponível em: <https://windows.lbl.gov/software/window/window.html> Acesso em: 19/08/2016

LAM, Joseph C.; HUI, Sam C. M.. Sensitivity Analysis of Energy Performance of Office Buildings. **Building And Environment**, Great Britain, v. 31, n. 1, p.27-39, mar. 1995.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R.. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Florianópolis: Eletrobras/procel, 2014. 366 p.

LEE, J. W. et al. Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements. **Renewable Energy**, [s.l.], v.50, p.522-531, fev.2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.07.029>.

LI, Danny H.W; LAM, Joseph C. Solar heat gain factors and the implications to building designs in subtropical regions. **Energy and Buildings**, [s.l.], v.32, n.1, p.47-55, jun.2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-7788\(99\)00035-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-7788(99)00035-3).

LINCZUK, Vinícius Cesar Cadena. **Estratégias para melhorar o comportamento térmico de edificações residenciais em regiões de clima temperado no sul do Brasil**. 2015. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. Análise da influência do desempenho térmico dos fechamentos opacos através do balanço térmico. In: XII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2008, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza, CE: Antac, 2008.

MME. Ministério de Minas e Energia. BEN – **Balanço Energético Nacional 2016**: ano base 2015. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/mme>> Acessado em: 06/03/2017.

OCHOA, Carlos E. et al. Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort. **Applied Energy**, [s.l.], v. 95, p.238-245, jul. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.042>.

PEREIRA, E.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. 2006. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. ISBN 978-85-17-00030-0.

PILLAR, Valério de Patta. 1995. **Clima e vegetação**. UFRGS, Departamento de Botânica. Disponível em <http://ecoqua.ecologia.ufrgs.br>

POIRAZIS, Harris; BLOMSTERBERG, Åke; WALL, Maria. Energy simulations for glazed office buildings in Sweden. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 40, n. 7, p.1161-1170, jan. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.10.011>.

SCHELLER, C.; SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Análise de Arquivos Climáticos para a Simulação de Desempenho Energético de Edificações**. Florianópolis, 2015.

SINGH, M. C.; GARG, S. N. Energy rating of different glazing for Indian climates. **Energy**, [s.l.], v. 34, n. 11, p.1986-1992, nov. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.08.013>.

STEGOU-SAGIA, A. et al. The impact of glazing on energy consumption and comfort. **Energy Conversion and Management**, [s.l.], v.48, n.11, p.2844-2852, nov.2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2007.07.005>.

TRAPANO, Patrícia di; BASTOS, Leopoldo Eurico Gonçalves. Forma e Qualidade Ambiental: Uma Discussão Sobre O Uso Do Vidro Em Obras Da Arquitetura Contemporânea Brasileira. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13. 2010, Canela, Rs. **Anais**. Canela, Rs: Antac, 2010.

TSAGARAKIS, Konstantinos P.; KARYOTAKIS, Konstantinos; ZOGRAFAKIS, Nikolaos. Implementation conditions for energy saving technologies and practices in office buildings: Part 2. Double glazing windows, heating and air-conditioning. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 16, n. 6, p.3986-3998,

ago. 2012. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.007>.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Engineering Reference**. Estados Unidos da América. DOE, 2016. Disponível em: <<https://energyplus.net/documentation>>. Acesso em: 27 set. 2016.

UTZINGER, Michael; WASLEY, James H. **Building Balance Point**. Milwaukee: Johnson Controls Institute for Environmental Quality in Architecture, School of Architecture and Urban Planning, University of Wisconsin-Milwaukee, 1997. 99 p.

WESTPHAL, Fernando Simon. **Análise de Incertezas e de Sensibilidade Aplicadas à Simulação de Desempenho Energético de Edificações Comerciais**. 2007. 147 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

WESTPHAL, Fernando Simon; ANDREIS, Cíntia. Influence of Glazed Façades on Energy Consumption for Air Conditioning of Building in Brazilian Climates. **Int. Journal Of Engineering Research And Application**, ISSN: 2248-9622, v. 6, n. 11, (parte 1) p.54-60, nov. 2016.

APÊNDICE A - Gráficos Comparativos entre Consumos Diários com Resfriamento do Ar: Modelo com Vidro Insulado X Modelo com Vidro Laminado.

PORTO ALEGRE

Figura A. 1 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. Porto Alegre, FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

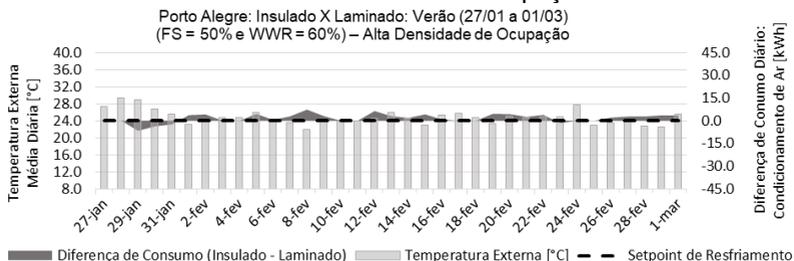


Figura A. 2 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. Porto Alegre, FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

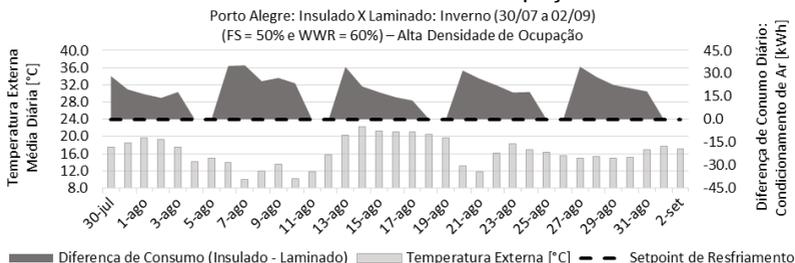


Figura A. 3 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. Porto Alegre, FS 50% e WWR 60%. Média Densidade de Ocupação.

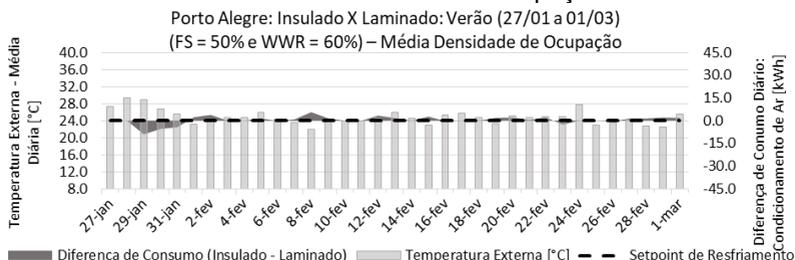
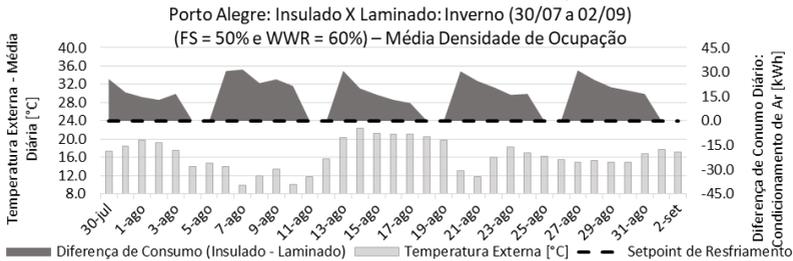


Figura A. 4 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. Porto Alegre, FS 50% e WWR 60%. Média Densidade de Ocupação.



FLORIANÓPOLIS

Figura A. 5 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. Florianópolis, FS 40% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

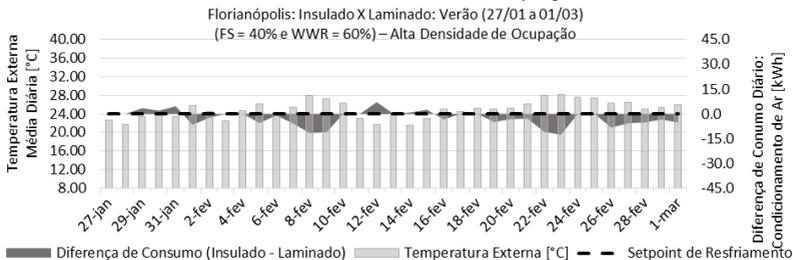


Figura A. 6 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. Florianópolis, FS 40% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

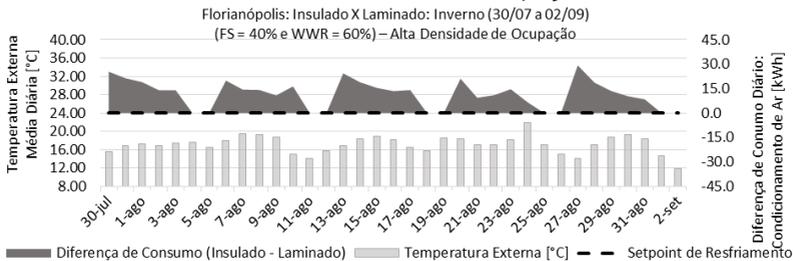


Figura A. 7 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. Florianópolis, FS 40% e WWR 60%. Média Densidade de Ocupação.

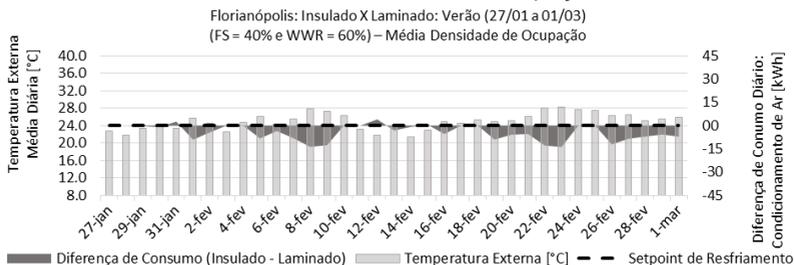
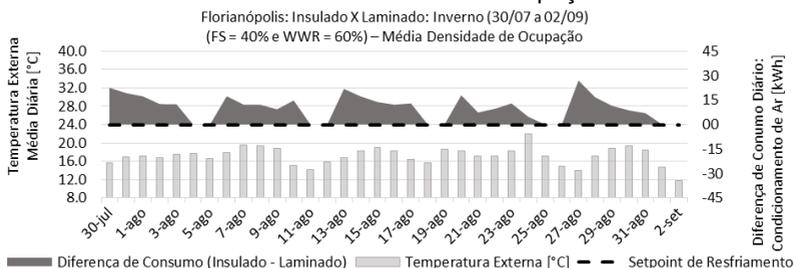


Figura A. 8 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. Florianópolis, FS 40% e WWR 60%. Média Densidade de Ocupação



CURITIBA

Figura A. 9 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. Curitiba, FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

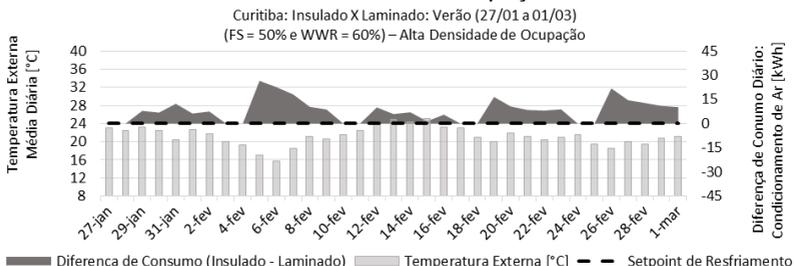


Figura A. 10 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. Curitiba, FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

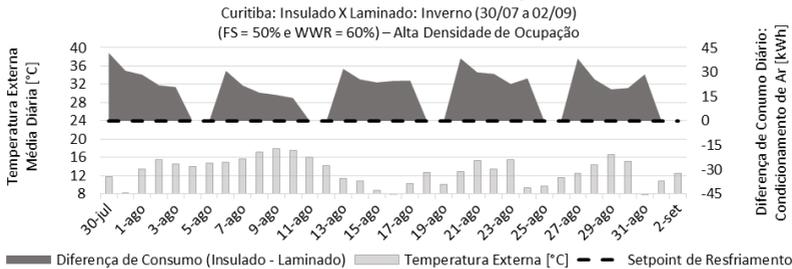


Figura A. 11 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. Curitiba, FS 50% e WWR 60%. Média Densidade de Ocupação.

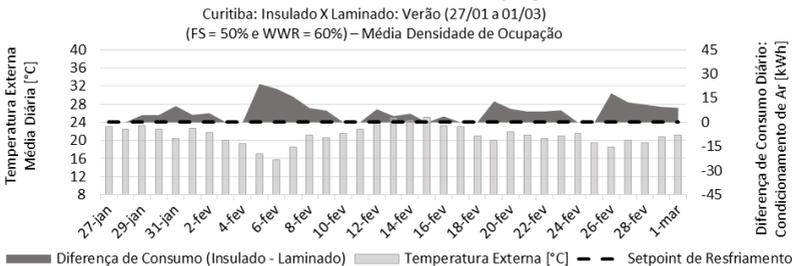
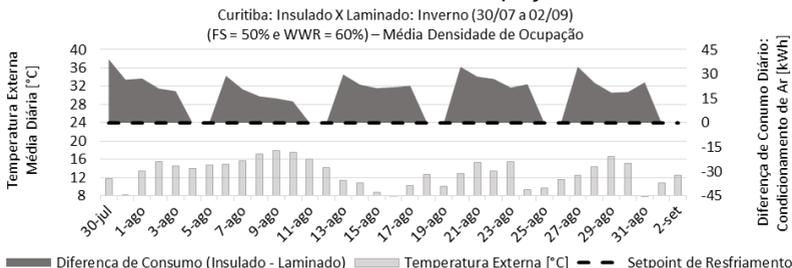


Figura A. 12 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. Curitiba, FS 50% e WWR 60%. Média Densidade de Ocupação.



CAMPO GRANDE

Figura A. 13 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. Campo Grande, FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

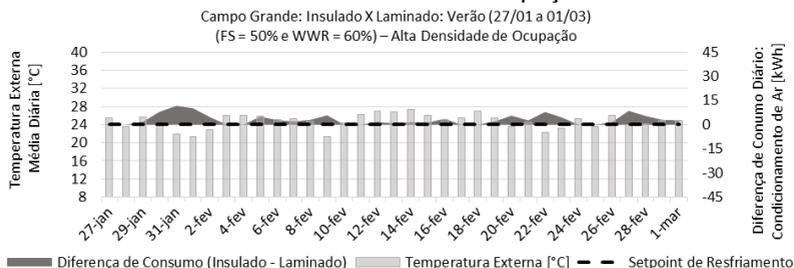


Figura A. 14 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. Campo Grande, FS 50% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

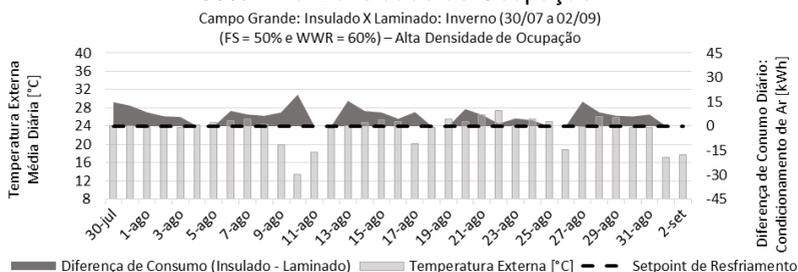


Figura A. 15 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. Campo Grande, FS 50% e WWR 60%. Média Densidade de Ocupação.

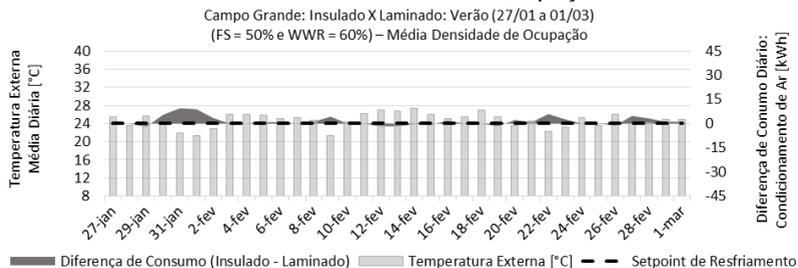
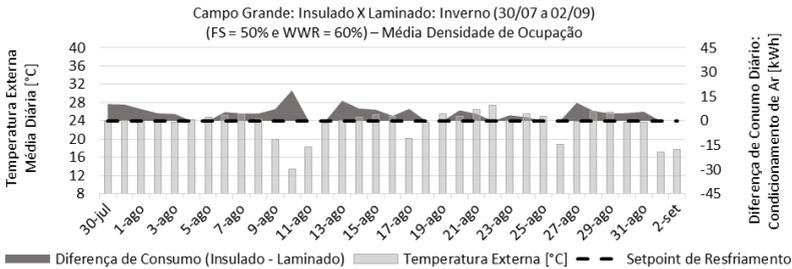


Figura A. 16 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. Campo Grande, FS 50% e WWR 60%. Média Densidade de Ocupação.



CUIABÁ

Figura A. 17 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. Cuiabá, FS 30% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

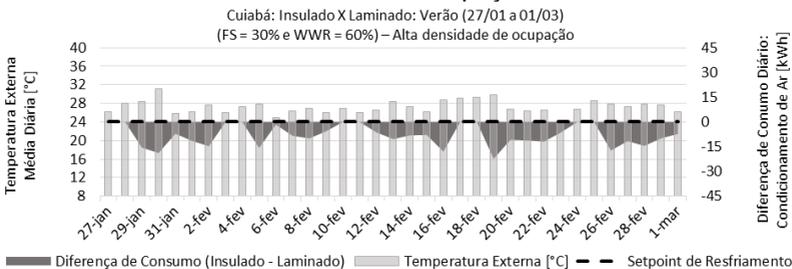


Figura A. 18 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. Cuiabá, FS 30% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

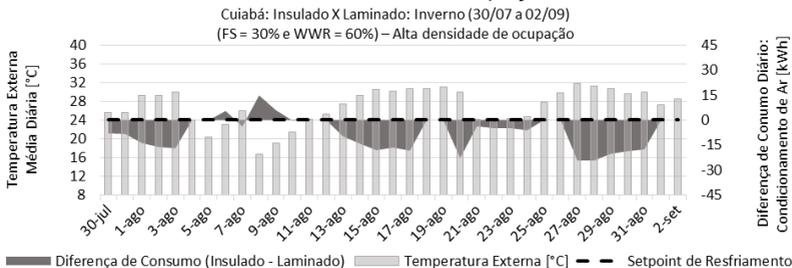


Figura A. 19 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. Cuiabá, FS 30% e WWR 60%. Média Densidade de Ocupação.

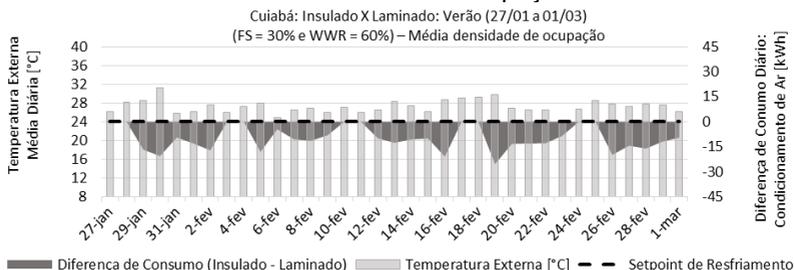
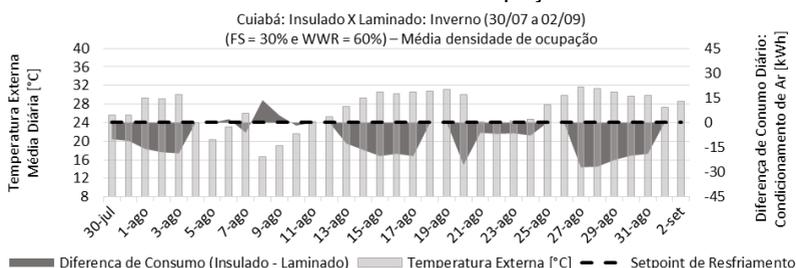


Figura A. 20 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. Cuiabá, FS 30% e WWR 60%. Média Densidade de Ocupação.



SALVADOR

Figura A. 21 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. Salvador, FS 30% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

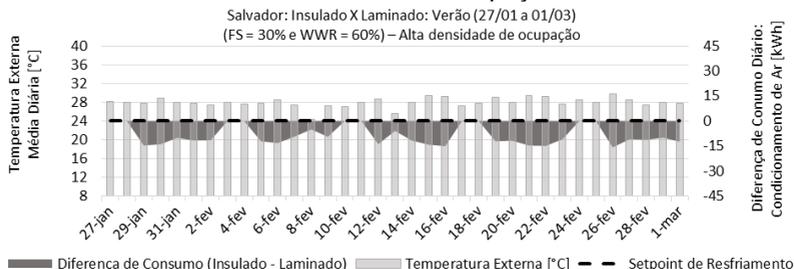


Figura A. 22 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. Salvador, FS 30% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

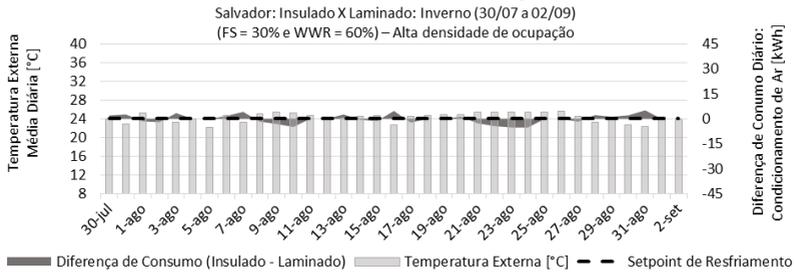


Figura A. 23 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. Salvador, FS 30% e WWR 60%. Média Densidade de Ocupação.

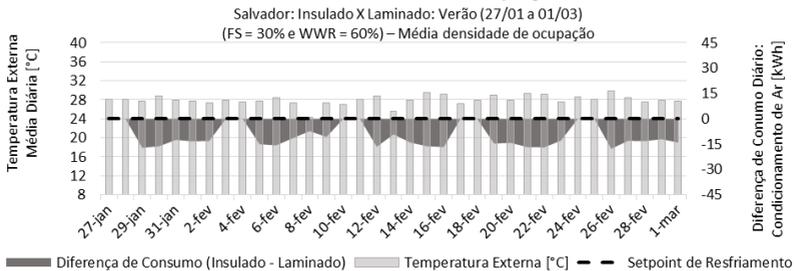
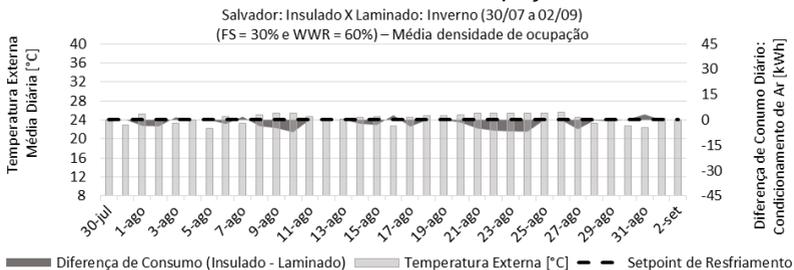


Figura A. 24 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. Salvador, FS 30% e WWR 60%. Média Densidade de Ocupação.



RECIFE

Figura A. 25 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. Recife, FS 30% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

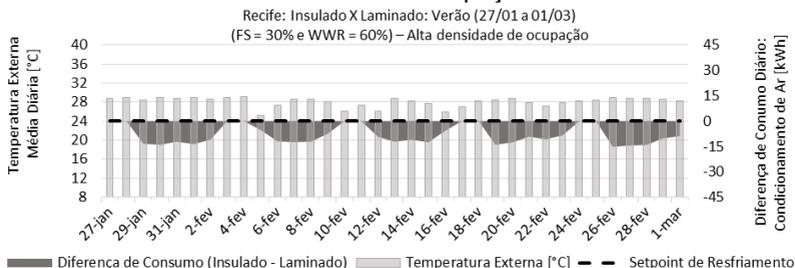


Figura A. 26 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. Recife, FS 30% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

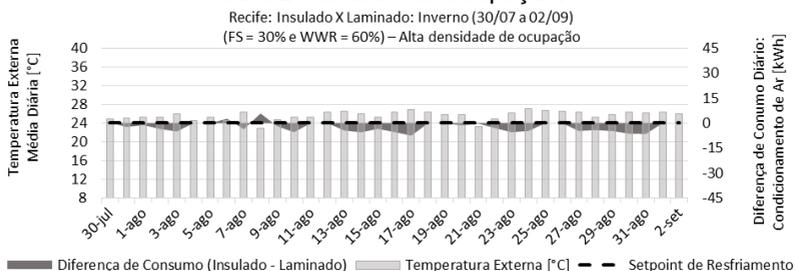


Figura A. 27 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. Recife, FS 30% e WWR 60%. Média Densidade de Ocupação.

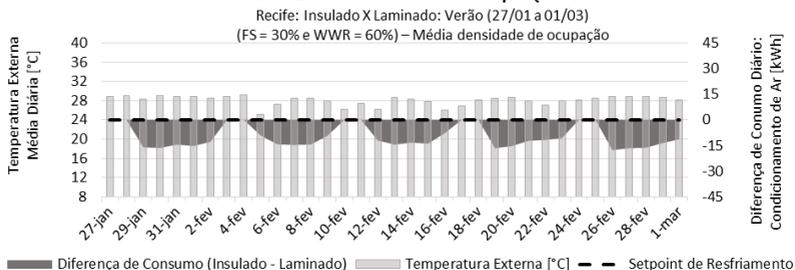
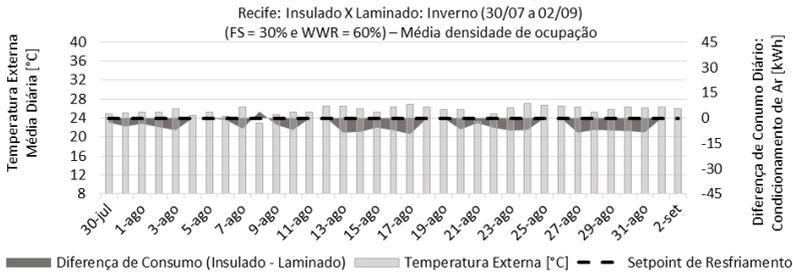


Figura A. 28 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. Recife, FS 30% e WWR 60%.
Média Densidade de Ocupação.



SÃO LUÍS

Figura A. 29 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. São Luís, FS 30% e WWR 60%.
Alta Densidade de Ocupação.

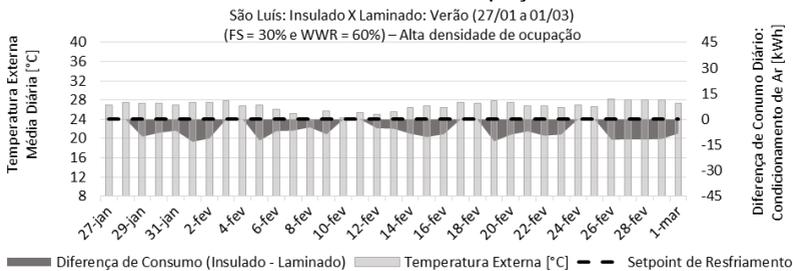


Figura A. 30 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. São Luís, FS 30% e WWR 60%.
Alta Densidade de Ocupação.

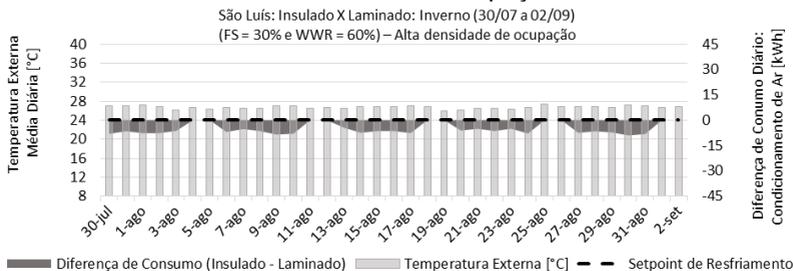


Figura A. 31 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. São Luís, FS 30% e WWR 60%. Média Densidade de Ocupação.

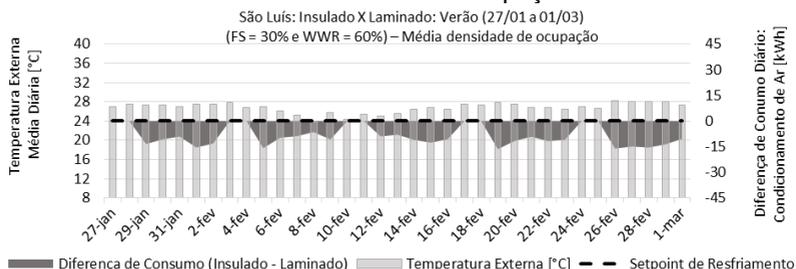
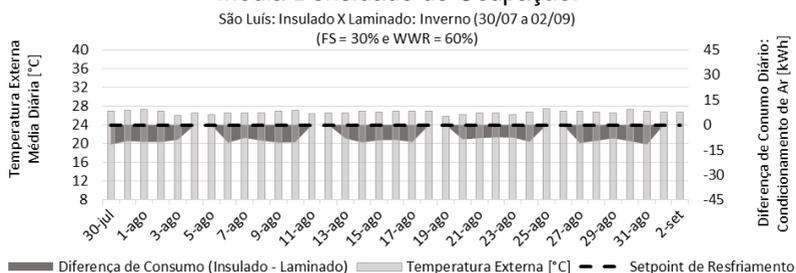


Figura A. 32 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. São Luís, FS 30% e WWR 60%. Média Densidade de Ocupação.



BOA VISTA

Figura A. 33 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. Boa Vista, FS 30% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

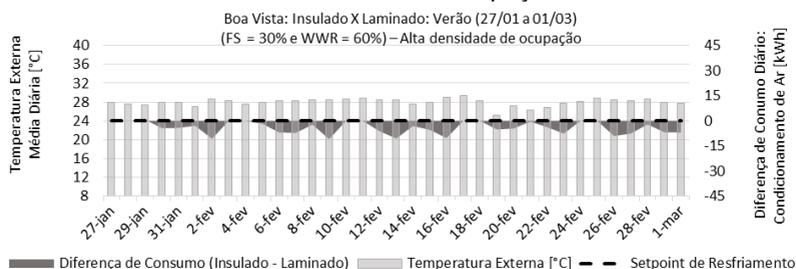


Figura A. 34 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. Boa Vista, FS 30% e WWR 60%. Alta Densidade de Ocupação.

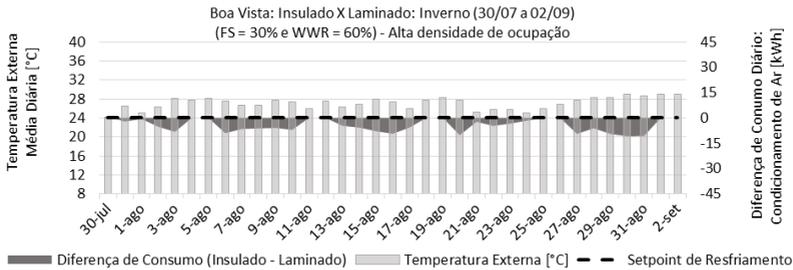


Figura A. 35 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Verão: Modelo Laminado x Insulado. Boa Vista, FS 30% e WWR 60%. Média Densidade de Ocupação.

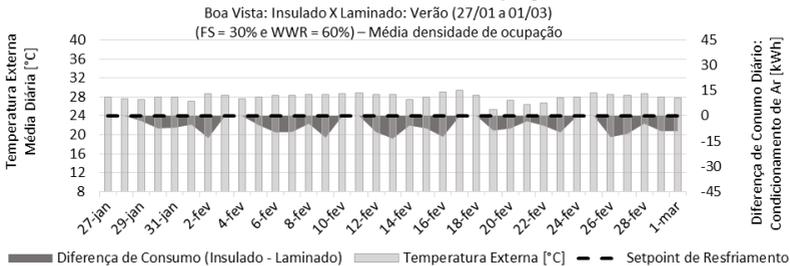
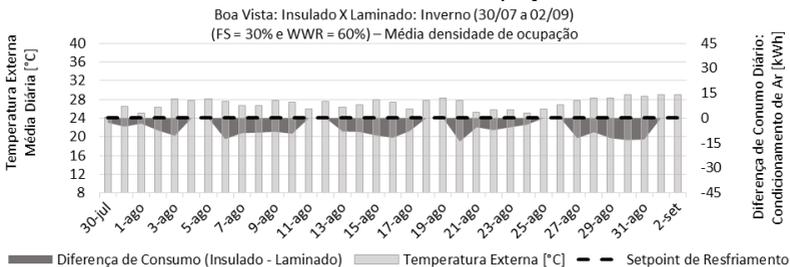


Figura A. 36 - Diferença de Consumo para Resfriamento Período de Inverno: Modelo Laminado x Insulado. Boa Vista, FS 30% e WWR 60%. Média Densidade de Ocupação.



APÊNDICE B - Gráficos de Diferença Percentual de Consumo Energético para Resfriamento do Ar Global e por Orientação Solar: (Insulado – Laminado)

Figura B. 1 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Porto Alegre. Alta densidade de ocupação.

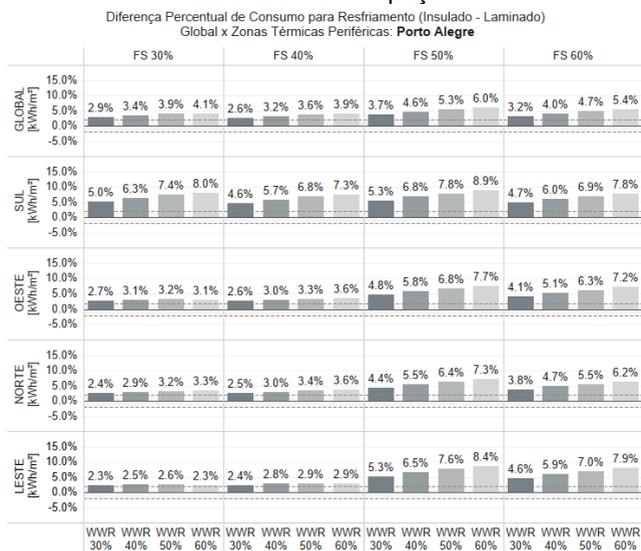


Figura B. 2 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Porto Alegre. Média densidade de ocupação.

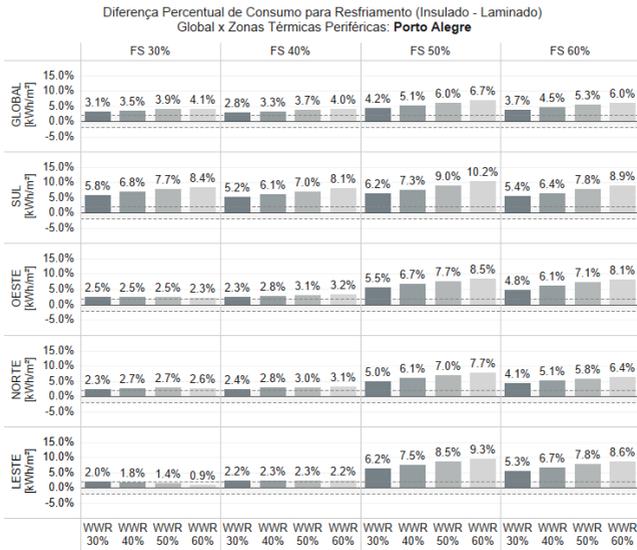


Figura B. 3 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Florianópolis. Média densidade de ocupação.

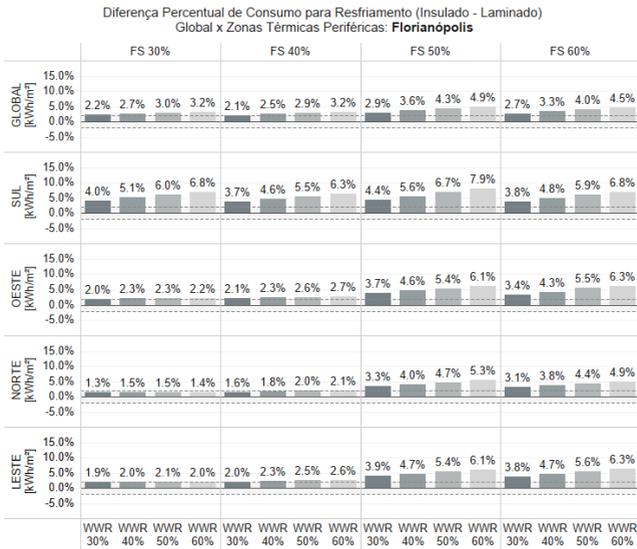


Figura B. 4 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Florianópolis. Média densidade de ocupação.

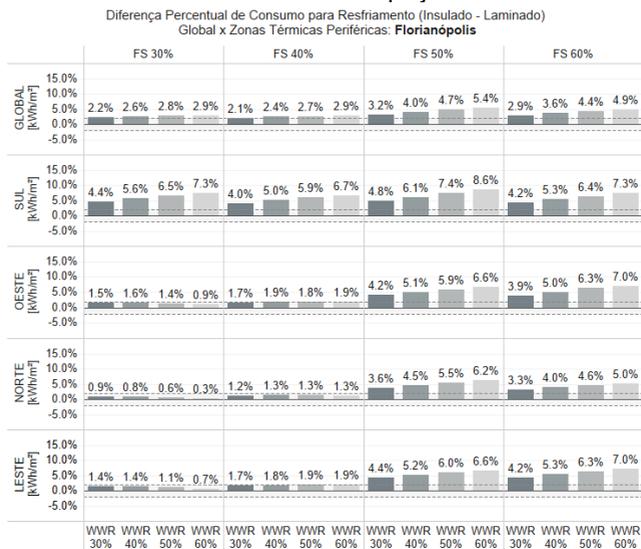


Figura B. 5 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Curitiba. Alta densidade de ocupação.

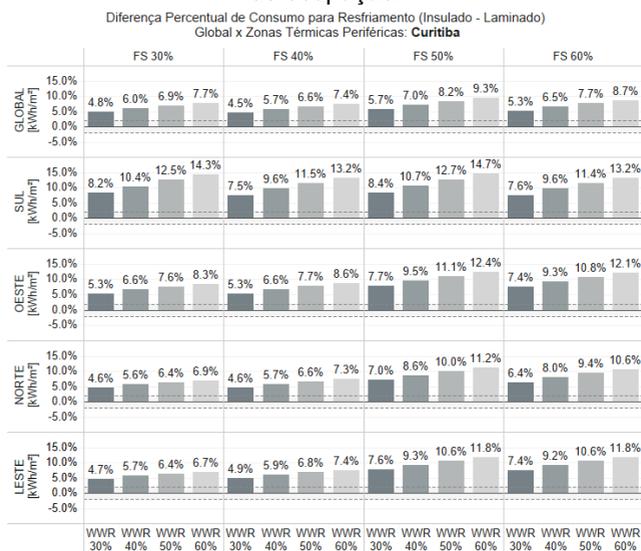


Figura B. 6 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Curitiba. Média densidade de ocupação.

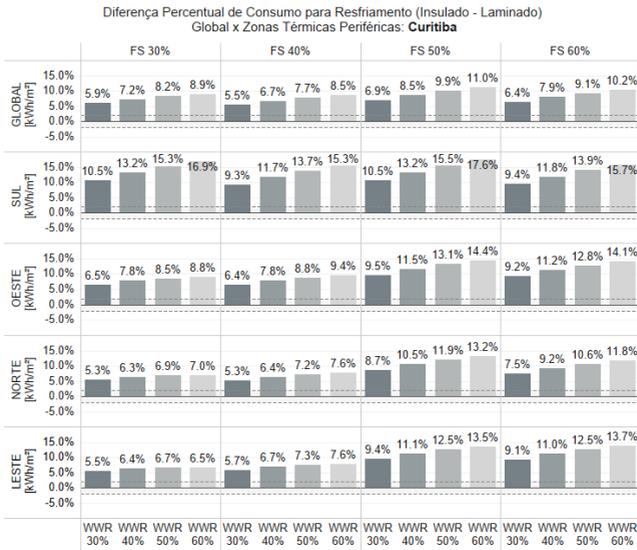


Figura B. 7 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Campo Grande. Alta densidade de ocupação.

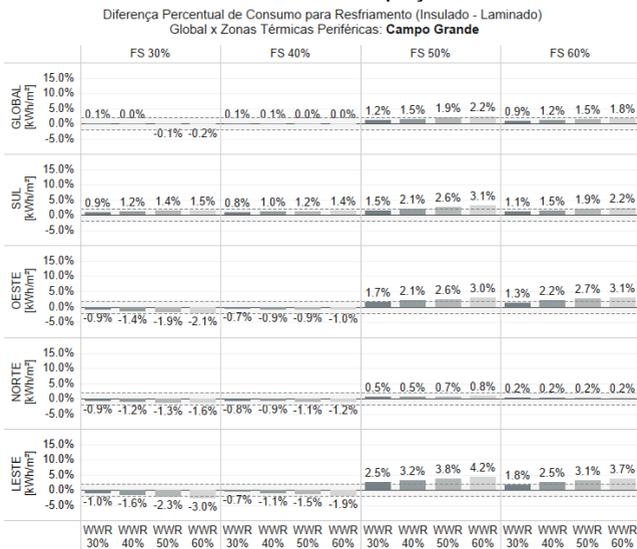


Figura B. 8 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Campo Grande. Média densidade de ocupação.

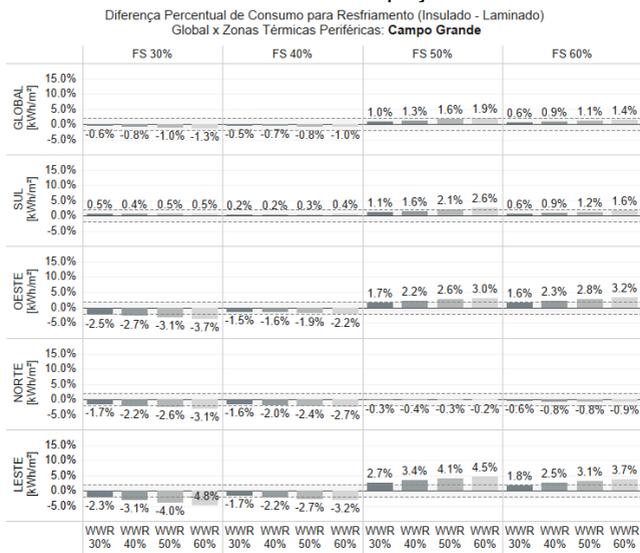


Figura B. 9 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Cuiabá. Alta densidade de ocupação.

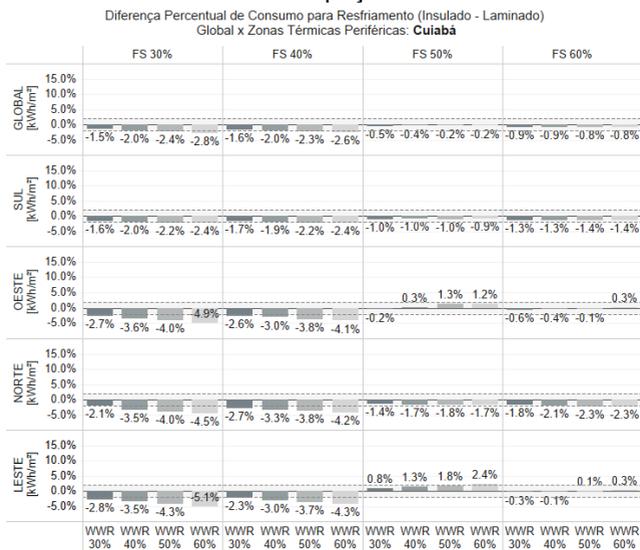


Figura B. 10 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Cuiabá. Média densidade de ocupação.

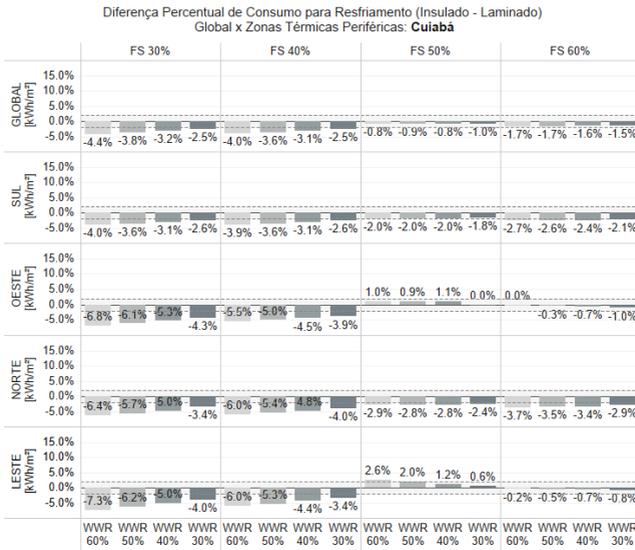


Figura B. 11 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Salvador. Alta densidade de ocupação.

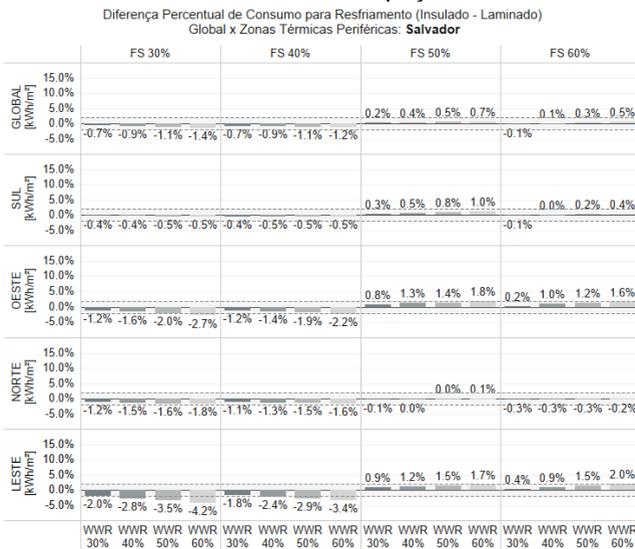


Figura B. 12 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Salvador. Média densidade de ocupação.

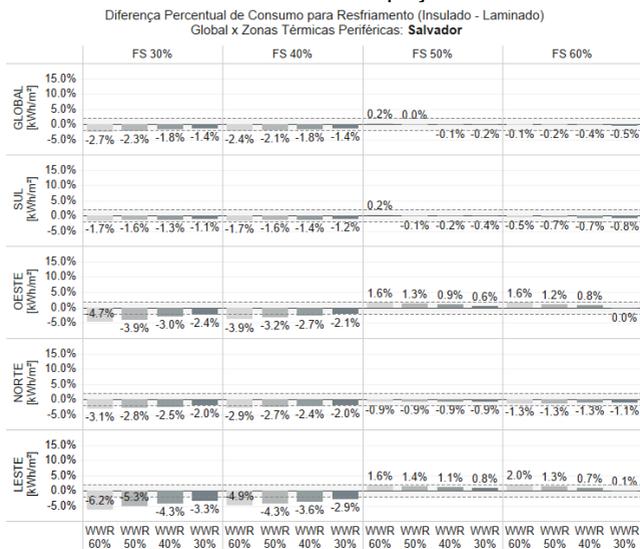


Figura B. 13 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Recife. Alta densidade de ocupação.

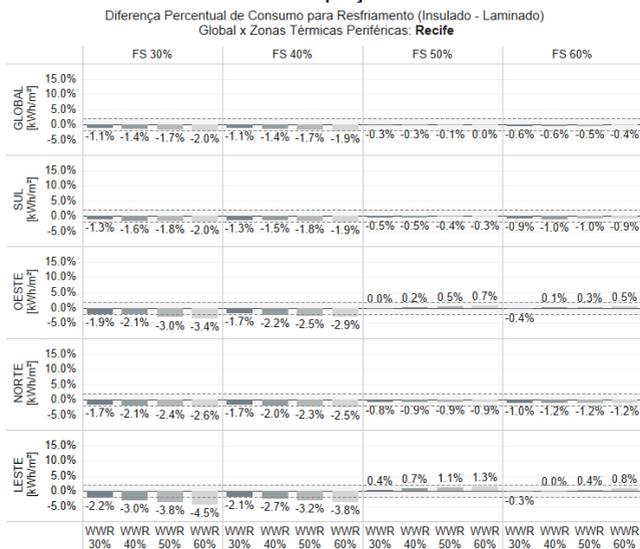


Figura B. 14 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Recife. Média densidade de ocupação.

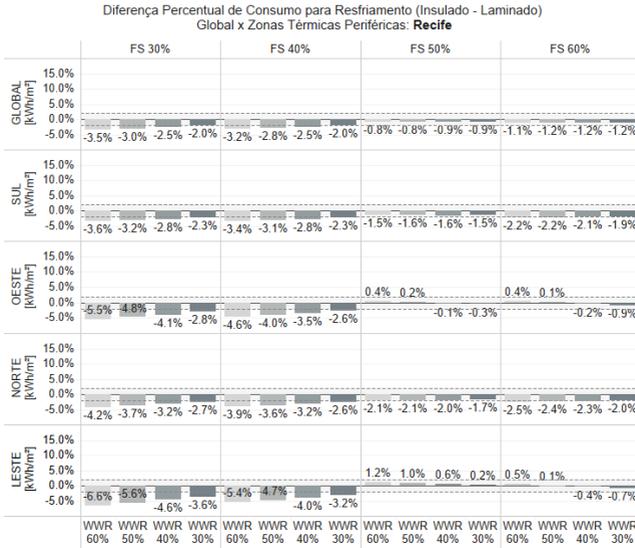


Figura B. 15 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: São Luís. Alta densidade de ocupação.

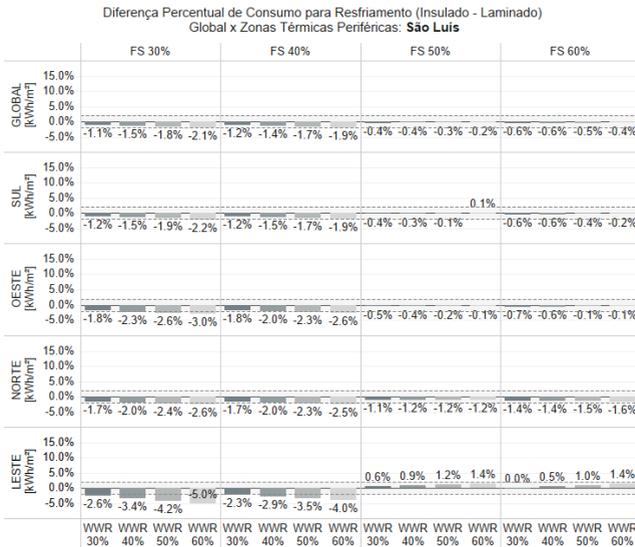


Figura B. 16 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: São Luís. Média densidade de ocupação.

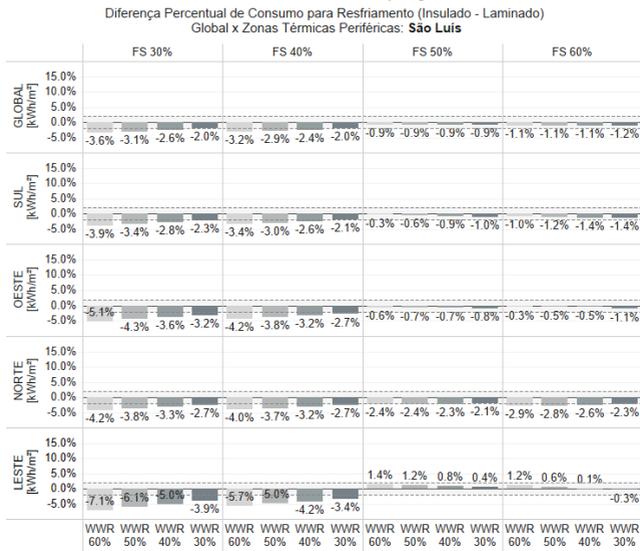


Figura B. 17 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Boa Vista. Alta densidade de ocupação.

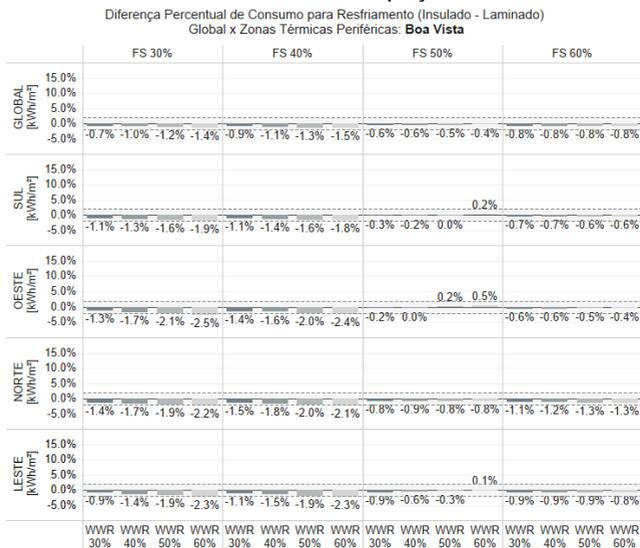
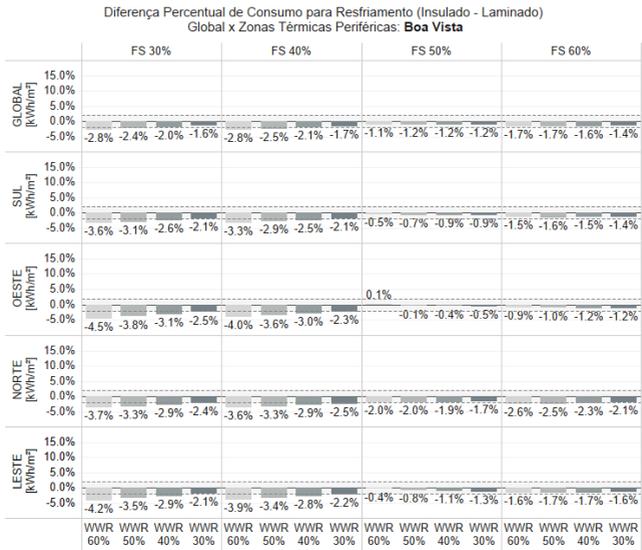


Figura B. 18 - Diferença percentual de consumo para resfriamento do ar (insulado - laminado) - Global x Zonas térmicas: Boa Vista. Média densidade de ocupação.



APÊNDICE C - Relação entre Consumo Energético para Resfriamento por Zonas Térmicas Periférica e a Radiação Solar Média Anual Incidente por Fachada

Legenda:

Barras = Radiação Solar Incidente na Fachada: Média Anual [W/m²]

Pontos = Consumo Energético com Resfriamento [kWh/m²]

Tons de **Laranja**: modelos com alta densidade de ocupação.

Tons de **Azul**: modelos com média densidade de ocupação.

Figura C. 1 - Relação entre consumo para resfriamento nas zonas térmicas e a radiação solar incidente: Porto Alegre.

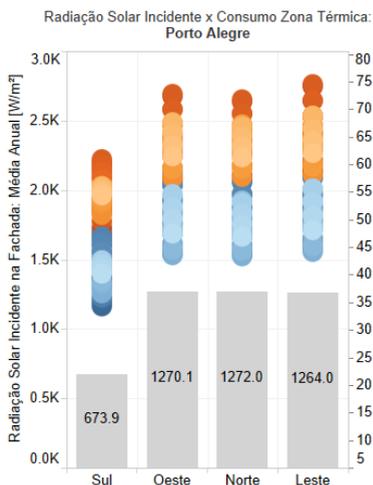


Figura C. 2 - Relação entre consumo para resfriamento nas zonas térmicas e a radiação solar incidente: Florianópolis.

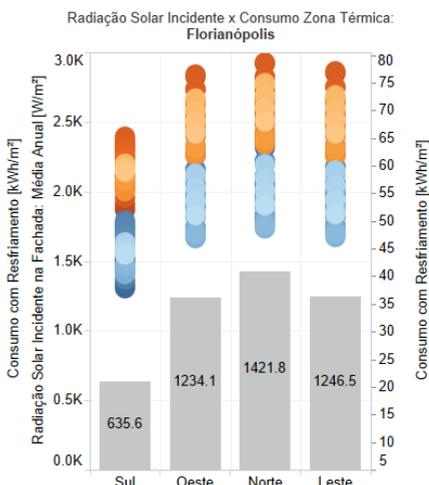


Figura C. 3 - Relação entre consumo para resfriamento nas zonas térmicas e a radiação solar incidente: Curitiba.

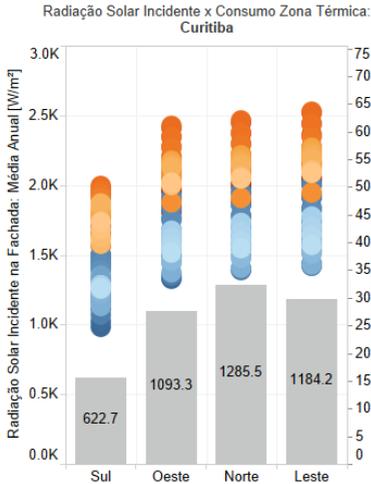


Figura C. 4 - Relação entre consumo para resfriamento nas zonas térmicas e a radiação solar incidente: Campo Grande.

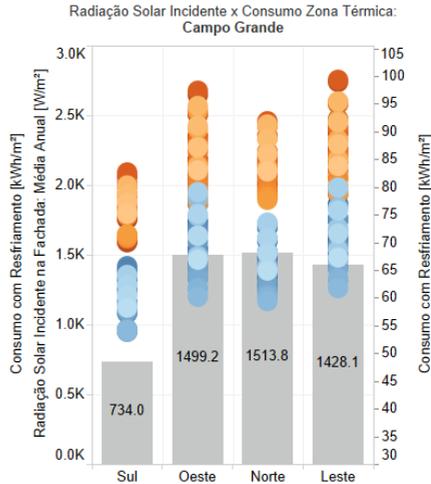


Figura C. 5 - Relação entre consumo para resfriamento nas zonas térmicas e a radiação solar incidente: Cuiabá.

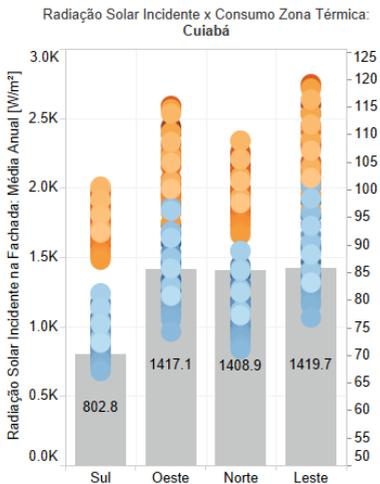


Figura C. 6 - Relação entre consumo para resfriamento nas zonas térmicas e a radiação solar incidente: Salvador.

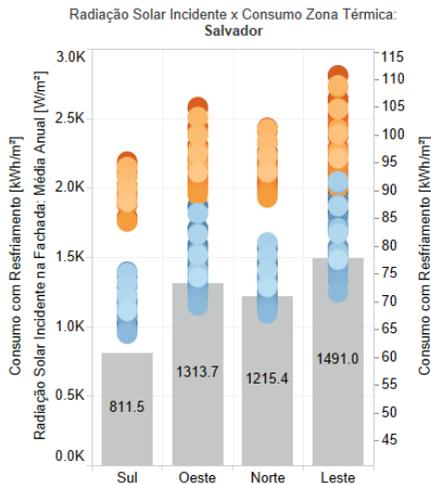


Figura C. 7 - Relação entre consumo para resfriamento nas zonas térmicas e a radiação solar incidente: Recife.

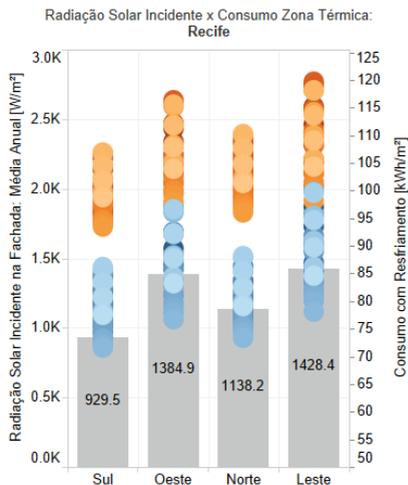


Figura C. 8 - Relação entre consumo para resfriamento nas zonas térmicas e a radiação solar incidente: São Luís.

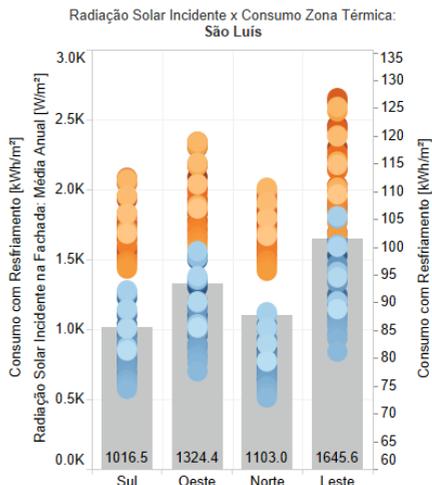


Figura C. 9 - Relação entre consumo para resfriamento nas zonas térmicas e a radiação solar incidente: Boa Vista.

