

Universidade Federal de Minas Gerais

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DOS
PROGRAMAS DOMUS E ENERGYPLUS**

Ana Carolina de Oliveira Veloso

Belo Horizonte
Fevereiro de 2012

Universidade Federal de Minas Gerais

ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DOS PROGRAMAS DOMUS E ENERGYPLUS

Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura, da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, área de concentração em Tecnologia do Ambiente Construído.

Orientadora:

Profa. Dra. Roberta Vieira Gonçalves de Souza

Belo Horizonte

Fevereiro/2012

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO PROGRAMA DOMUS EM COMPARAÇÃO COM O PROGRAMA ENERGY PLUS

Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura, da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, área de concentração em Tecnologia do Ambiente Construído.

Aprovado por:

Profa. Dra. Roberta Vieira Gonçalves De Souza – EA/UFMG - Orientadora

Prof. Dr. Nathan Mendes – PUC/PR

Prof. Dr. Ricardo Nicolau Nassar Koury – DEMEC/UFMG

Belo Horizonte

Fevereiro/2012

BIBLIOTECA

A ficha catalográfica é confeccionada pela Biblioteca.

Tamanho: 7cm x 12 cm

Fonte: Times New Roman 9,5

AGRADECIMENTOS

À Profa. Roberta Vieira Gonçalves de Souza pela orientação, amizade, confiança e todo conhecimento repassado durante esses quatro anos de convivência no LABCON-UFMG.

Ao Prof. Nathan Mendes pelo auxílio prestado no desenvolvimento desse trabalho e a disponibilização do programa Domus para todos os testes.

Aos professores Iraci Miranda e José Rubens Gonçalves de Souza por toda contribuição dada durante o exame de qualificação e durante todo o desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Conforto Ambiental da UFMG e os bolsistas do Laboratório de Sistemas Térmicos da PUC/PR, pelos inúmeros auxílios prestados no uso do programa Domus e Energy Plus e as meninas da ARES, pela ajuda e compreensão durante esses dois anos.

À Eletrobrás pelo financiamento deste trabalho ligado ao desenvolvimento do programa Domus.

A minha família, pelo carinho, apoio e incentivo dado em todo momento.

A todos meus amigos que torceram por mim e que, de alguma forma, contribuíram para o êxito deste trabalho.

RESUMO

Estudos do uso de energia em edifícios são complexos e exigem interface de várias áreas do conhecimento. De forma a abarcar informações multidisciplinares das áreas de arquitetura, engenharia mecânica, fenômenos comportamentais e de climatologia, a simulação computacional se destaca como uma das ferramentas de avaliação do gasto energético. Com isso, a PUC-PR em parceria com a Eletrobrás (Centrais Elétricas Brasileiras S.A), está aperfeiçoando o programa Domus para a análise dos requisitos estabelecidos pelo RTQ-C. Dessa forma, o objetivo desse trabalho é analisar por meio de simulação computacional a usabilidade do programa Domus por meio de simulações paramétricas comparando-as o programa, o Energy Plus. Para isso, utilizou-se um modelo representativo de edifício de escritórios de pequeno porte com cinco pavimentos e este foi desmembrado em quatro protótipos testes (monozona sem janela, monozona com janela, multizona sem janela e multizona com janela), em que foi possível simular os parâmetros de temperatura interna, graus hora e ganhos térmicos das componentes construtivas nas 8760 horas do ano. Observou-se que os resultados encontrados na análise de temperaturas internas, mostraram que os dois programas apresentam boa correlação, o mesmo acontecendo com os graus hora diários pequena diferença, apresentando uma diferença máxima nos graus hora de resfriamento de 3,2% de superestimação do Domus em relação ao Energy Pus na monozona com janela. Nos graus hora de aquecimento, as diferenças foram menores que os dos graus hora de aquecimento, apresentando uma diferença máxima de 0,3% entre os programas. Por fim, na comparação dos ganhos térmicos das componentes construtivas, muitas superfícies apresentaram comportamento próximo entre os programas, mas algumas, principalmente aquelas em contato com outra superfície, apresentam resultados dispersos.

Palavras chave: simulação termoenergética, temperatura interna, graus hora, ganhos térmicos e comparação de programas de simulação.

ABSTRACT

Studies of energy use in buildings are complex and require interface of several fields of knowledge. In order to encompass the multidisciplinary field of information architecture, mechanical engineering, and behavioral phenomena of climatology, computer simulation stands out as one of the tools for assessing energy expenditure. Thus, in order to consolidate the use of a thermo-energetic simulation program in the process of labeling for energy efficiency in buildings in Brazil, the Technical Regulation for the Quality Level of Energy Efficiency in Commercial, Service and Public Buildings (RTQ-C), the PUC-PR in partnership with Eletrobras (Brazilian Electric Power Company), is working to improve the Domus program for the analysis of the requirements established by RTQ-C. Thus, the purpose of this paper is to analyze, by means of computer simulation, the Domus program usability through parametric simulations, comparing them with another internationally recognized program, the Energy Plus. In order to do it, we used a representative model of a small size office building with five floors, being divided into four prototype tests (monozone without window, monozone with window, multizone without window and multizone with window), which made possible simulating the parameters of internal temperature, degrees/hour and thermal gain of constructive components in the 8760 hours of a year. The results obtained in the analysis of indoor temperatures revealed that the two programs show good correlation, unlike the assessment done through the degrees/hour, in which differences occur mainly in monozone models. In the comparison of thermal gain of constructive components, many surfaces showed similar behavior between programs; but some, especially those in contact with another surface, showed different results.

Keywords: thermoenergetic simulation , internal temperature, degrees/hour, thermal gain and compararison of simulation programs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etiqueta final de Classificação da Eficiência Energética do Edifício.	31
Figura 2: Interações dinâmicas de sub-sistemas de edifícios	34
Figura 3: Simulação integrada do Energy Plus	35
Figura 4: Janela de apresentação do Domus.....	36
Figura 5: Visualização do Domus na caracterização do ar condicionado de expansão direta	37
Figura 6: Visualização da tela onde são solicitados os dados de saída do Domus.....	38
Figura 7: Organograma do programa Domus.....	39
Figura 8: O princípio da metodologia de validação do modelo PASSYS	43
Figura 9: Representação gráfica do protótipo base para simulação da ASHRAE Standard 140.....	46
Figura 10: Fluxograma esquemático da metodologia adotada.....	50
Figura 11: Desenho representativo do modelo base.....	51
Figura 12: Planta baixa do modelo base	51
Figura 13: Modelos testes – (1) Monozona sem janela; (2) Monozona com janela; (3) Multizona sem janela; (4) Multizona com janela.....	56
Figura 14: Organograma esquemático da metodologia adotada para o desenvolvimento das simulações do presente trabalho de dissertação.....	59
Figura 15: Ganhos térmicos dos programas Energy Plus e Domus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de monozona sem janela: global e nas superfícies sul, piso e teto.....	66

Figura 16: Ganhos térmicos dos programas Energy Plus e Domus dia estável de verão (19/12) no protótipo de monozona sem janela: global e nas superfícies sul, piso e teto.....	67
Figura 17: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de monozona com janelas: global e nas superfícies sul, piso e teto	73
Figura 18: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de monozona com janelas: global e nas superfícies sul, piso e teto	73
Figura 19: Ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizona sem janelas nas superfícies sul, piso e teto no 1° andar	83
Figura 20: Ganhos térmicos o Domus e no Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) na multizona sem janelas no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies sul, piso e teto no 3° andar	83
Figura 21: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies sul, piso e teto no 5° andar	84
Figura 22: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies sul, piso e teto no 1° andar	85
Figura 23: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies sul, piso e teto no 3° andar	86
Figura 24: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies sul, piso e teto no 5° andar	87

Figura 25: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies sul, piso e teto no primeiro andar	98
Figura 26: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies sul, piso e teto no terceiro andar	98
Figura 27: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies sul, piso e teto no quinto andar	99
Figura 28: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies sul, norte, piso e teto no 1° andar.....	100
Figura 29: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies sul, norte, piso e teto no terceiro andar	101
Figura 30: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies sul, norte, piso e teto no quinto andar	102
Figura 31: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de monozona sem janelas nas superfícies norte, oeste e leste ...	113
Figura 32: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de monozona sem janelas nas superfícies norte, oeste e leste. ...	114
Figura 33: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de monozona com janelas nas superfícies janela, norte, oeste e leste.....	115
Figura 34: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de monozona com janelas nas superfícies janelas, norte, peste e leste.....	116

Figura 35: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies leste, oeste e norte no 1° andar.....	117
Figura 36: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies leste, oeste e norte no 3° andar.....	118
Figura 37: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies leste, oeste e norte no 5° andar.....	119
Figura 38: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies norte, oeste e leste no 1° andar.....	120
Figura 39: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies leste, oeste e norte no 3° andar.....	121
Figura 40: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies leste, oeste e norte no 5° andar.....	122
Figura 41: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies janela, leste, oeste e norte no 1° andar.....	123
Figura 42: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies leste, oeste e norte no 3° andar.....	124
Figura 43: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies leste, oeste e norte no 5° andar.....	125

Figura 44: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies janela, leste, oeste e norte no 1° andar.....	126
Figura 45: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies janela, leste, oeste e norte no 3° andar.....	127
Figura 46: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies janela, leste, oeste e norte no 5° andar.....	128

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Participação percentual setorial no consumo de energia do país no ano de 2010	21
Figura 2: Consumo final de eletricidade com incidência simultânea do progresso autônomo e induzido	22
Gráfico 3: Fluxo solar incidente e fluxo de calor interno na parede orientado para sul no protótipo base – comparação dos resultados fornecidos pelo Programa Domus e pelo teste RP-1052 ISF	40
Gráfico 4: Teste de aquecimento anual em construção com massa leve. Comparação dos resultados fornecidos pelo Programa Domus e pelos programas ESP, Blast, Doe, Sres, S3pas, Trnsys, Tase e Energy Plus 1.2.0	41
Gráfico 5: Temperatura externa e temperaturas internas do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de monozona sem janela	61
Gráfico 6: Temperatura externa e temperaturas internas do Domus e do Energy plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de monozona sem janela	62
Gráfico 7: Temperatura interna e externa anual do programa Domus e Energy Plus demonstrando os valores acima e abaixo dos limites de temperatura do protótipo de monozona sem janela	63
Gráfico 8: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e Energy Plus do protótipo de monozona sem janela para todas as superfícies opacas	64
Gráfico 9: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e Energy Plus do protótipo de monozona sem janela das superfícies teto, piso e sul	64
Gráfico 10: Temperaturas externa e interna fornecidas pelos programas Domus e Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de monozona com janela	68
Gráfico 11: Temperaturas externa e internas fornecidas pelos programas Domus e Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) n no protótipo de monozona com janela.....	68

Gráfico 12: Temperatura externa e interna do Domus e do Energy Plus horária ao longo do ano do protótipo de monozona com janelas com delimitação das temperaturas limites mínima e máxima para cálculo de graus hora.....	70
Gráfico 13: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus de todas as superfícies do protótipo monozona com janelas	71
Gráfico 14: Regressão dos ganhos térmicos internos do Domus e do Energy das superfícies opacas do protótipo de monozona com janelas	71
Gráfico 15: Temperaturas externas e internas do Domus e do Energy Plus em um dia estável de inverno (15/07) e dia estável de verão (19/12) no protótipo com multizonas sem janelas	75
Gráfico 16: Temperatura horária anual: externa e internas do Domus e do Energy Plus com delimitação da faixa para cálculo de graus-hora do 1° andar no protótipo com multizonas sem janelas	76
Gráfico 17: Temperatura horária anual: externa e internas do Domus e do Energy Plus com delimitação da faixa para cálculo de graus-hora do 2° andar no protótipo com multizonas sem janelas	77
Gráfico 18: Temperatura horária anual: externa e internas do Domus e do Energy Plus com delimitação da faixa para cálculo de graus-hora do 3° andar no protótipo com multizonas sem janelas	77
Gráfico 19: Temperatura horária anual: externa e internas do Domus e do Energy Plus com delimitação da faixa para cálculo de graus-hora do 4° andar no protótipo com multizonas sem janelas	78
Gráfico 20: Temperatura horária anual: externa e internas do Domus e do Energy Plus com delimitação da faixa para cálculo de graus-hora do 5° andar no protótipo com multizonas sem janelas	78
Gráfico 21: Regressão dos ganhos térmicos horários ao longo do ano no primeiro pavimento do protótipo de multizonas sem janela para as superfícies opacas teto piso e fachadas norte, sul, leste e oeste.	79

Gráfico 22: Regressão dos ganhos térmicos horários ao longo do ano no segundo pavimento do protótipo de multizonas sem janela para as superfícies opacas teto piso e fachadas norte, sul, leste e oeste.	80
Gráfico 23: Regressão dos ganhos térmicos horários ao longo do ano no terceiro pavimento do protótipo de multizonas sem janela para as superfícies opacas teto piso e fachadas norte, sul, leste e oeste.	80
Gráfico 24: Regressão dos ganhos térmicos horários ao longo do ano no quarto pavimento do protótipo de multizonas sem janela para as superfícies opacas teto piso e fachadas norte, sul, leste e oeste.	81
Gráfico 25: Regressão dos ganhos térmicos horários ao longo do ano no quinto pavimento do protótipo de multizonas sem janela para as superfícies opacas teto piso e fachadas norte, sul, leste e oeste.	81
Gráfico 26: Temperaturas externa e internas do Domus e do Energy Plus em um dia estável de inverno (15/07) e dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas com janelas	89
Gráfico 27: Temperatura horária anual externa e interna do Domus e do Energy Plus com delimitação das temperaturas máxima e mínima para o cálculo dos graus-hora do primeiro andar	90
Gráfico 28: Temperatura horária anual externa e interna do Domus e do Energy Plus com delimitação das temperaturas máxima e mínima para o cálculo dos graus-hora do segundo andar	91
Gráfico 29: Temperatura horária anual externa e interna do Domus e do Energy Plus com delimitação das temperaturas máxima e mínima para o cálculo dos graus-hora do terceiro andar	91
Gráfico 30: Temperatura horária anual externa e interna do Domus e do Energy Plus com delimitação das temperaturas máxima e mínima para o cálculo dos graus-hora do quarto andar	92

Gráfico 31: Temperatura horária anual externa e interna do Domus e do Energy Plus com delimitação das temperaturas máxima e mínima para o cálculo dos graus-hora do quinto andar	92
Gráfico 32: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no primeiro pavimento no protótipo de multizonas com janelas: todas as superfícies	93
Gráfico 33: Regressão dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no primeiro pavimento no protótipo de multizonas com janelas para as superfícies opacas	94
Gráfico 34: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no segundo pavimento no protótipo de multizonas com janelas para as superfícies opacas.....	95
Gráfico 35: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no terceiro pavimento no protótipo de multizonas com janelas para as superfícies opacas.....	95
Gráfico 36: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no quarto pavimento no protótipo de multizonas com janelas para as superfícies opacas .	96
Gráfico 37: Regressão linear dos ganhos térmicos no Domus e no Energy Plus no quinto pavimento no protótipo de multizonas com janelas para as superfícies opacas .	96
Gráfico 38: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no segundo pavimento no protótipo de multizonas com janelas: todas as superfícies	129
Gráfico 39: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no terceiro pavimento no protótipo de multizonas com janelas: todas as superfícies	130
Gráfico 40: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no quarto pavimento no protótipo de multizonas com janelas: todas as superfícies	131
Gráfico 41: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no quinto pavimento no protótipo de multizonas com janelas: todas as superfícies	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Modelos representativos testados para o desenvolvimento do RTQ-C.....	28
Tabela 2: Características do material utilizado nas paredes	52
Tabela 3: Características dos materiais utilizados no teto e no piso	53
Tabela 4: Características do material especificado para simulação das superfícies envidraçadas nos programas Domus e Energy Plus.....	54
Tabela 5: Média Anual de Temperatura do protótipo de monozona sem janela	61
Tabela 6: Graus hora de aquecimento e resfriamento no Domus e no Energy Plus no protótipo de monozona sem janelas.....	63
Tabela 7: Média Anual de Temperatura interna fornecida pelo Domus e pelo Energy Plus para o protótipo de monozona com janelas.....	67
Tabela 8: Graus hora de aquecimento e resfriamento no Domus e no Energy Plus no protótipo de monozona com janelas.....	69
Tabela 9: Temperatura externa e interna nos programas Domus e Energy Plus no protótipo com multizonas sem janelas	74
Tabela 10: Graus hora de aquecimento e de resfriamento do Domus e Energy Plus no protótipo com multizonas sem janelas	76
Tabela 11: Temperatura externa e interna nos programas Domus e Energy Plus na multizonas com janelas	88
Tabela 12: Graus hora de aquecimento e de resfriamento do Domus e Energy Plus.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGRAS E SÍMBOLOS

ASHRAE- American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers

BEN - Balanço Energético Nacional

COP - Coeficiente de performance

DLL- Dynamic Link Library

DOE - U. S. Department of Energy

INMETRO- Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

MDB - Mean Bias Deviation

MME- Ministério das Minas e Energia

PMV - Voto Médio Predito (Predicted Mean Vote)

PNE – Plano Nacional de Energia

PPD - Percentagem de Pessoas Insatisfeitas (Predicted percentage of dissatisfied)

PROCEL- Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

RMSD - Root Mean Square Deviation

RTQ- C - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos

RTQ- R - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais

TRY - *Typical Reference Year*

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 Justificativa	21
1.2 Objetivos	23
1.2.1 Gerais	23
1.2.2 Específicos.....	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 Regulamento Técnico da Qualidade para Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C	26
2.1.1 Desenvolvimento das equações do RTQ-C	27
2.2 Simulação Computacional termoenergética de edificações.....	33
2.2.1 Programas de simulação	34
2.2.1.1 EnergyPlus	34
2.2.1.2 Domus.....	36
2.2.2 Validação do programa Domus	40
2.2.3 Validação de programas de simulação.....	41
2.3 Indicadores de desempenho de modelos	46
3. METODOLOGIA	48
3.1 Definição do modelo base.....	50
3.2 Protótipos de teste	54
3.3 Parâmetros analisados	56

3.4	Análise de desempenho.....	57
4.	RESULTADOS.....	60
4.1	Monozona sem janela.....	61
4.2	Monozona com janela.....	67
4.3	Multizona sem janelas.....	74
4.4	Multizona com janelas.....	88
5.	CONCLUSÕES.....	103
5.1	Conclusões Gerais.....	104
5.2	Recomendações para trabalhos futuros.....	106
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
	ANEXO A.....	113
	ANEXO B.....	129

1. INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

A energia tem um papel fundamental no desenvolvimento e no progresso da humanidade sendo que cerca de um terço da população mundial tem somente acesso a fontes de energia como carvão e lenha. De acordo com Geller (2003), a distribuição e o acesso a essas fontes afetam as relações entre os países e causam grandes conflitos entre eles.

Com a crise do petróleo no início da década de 70, houve uma grande preocupação com o uso racional de energia e com a questão ambiental. Os esforços em se diversificar a matriz energética tinham como um dos objetivos mitigar os impactos que a extração e o uso dos combustíveis fósseis causavam ao meio ambiente.

Neste conceito do uso racional de energia e na questão ambiental, as edificações podem dar uma importante contribuição, pois elas são responsáveis por uma parcela significativa do consumo de energia elétrica e da produção de resíduos de construção, além de serem grandes consumidoras de matéria prima. De acordo com o BEN (2010), a demanda de energia elétrica no país demonstra uma significativa concentração no consumo ligado ao parque edificado principalmente nos setores comerciais, residenciais e públicos, com uma parcela de 48% do consumo total (Gráfico 1).

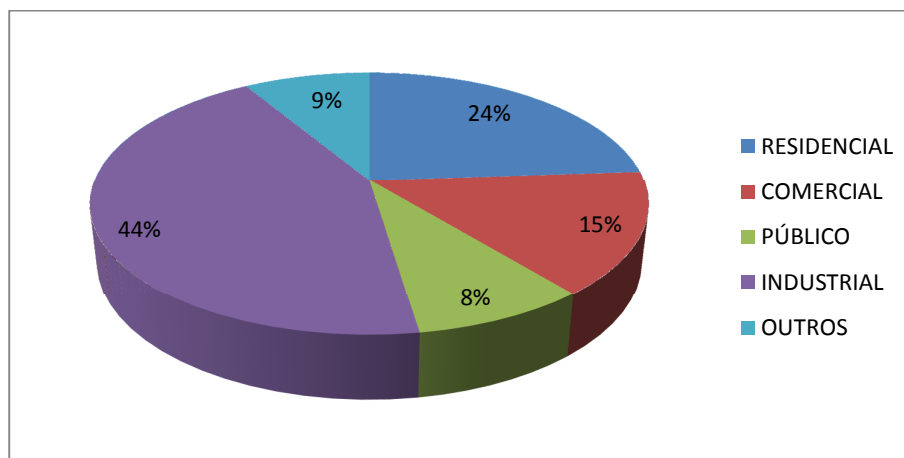


Gráfico 1: Participação percentual setorial no consumo de energia do país no ano de 2010

Fonte: BEN, 2010

Projetando um cenário futuro, o PNE - Plano Nacional de Energia - 2030 prevê que com ações de eficiência energética, a tendência de aumento na demanda do consumo no Brasil pode diminuir caso continue havendo políticas governamentais nesse setor. A Figura 2 mostra os dois cenários: o primeiro apresenta o processo autônomo do crescimento, com o consumo esperado e o segundo apresenta a situação caso aconteça um programa de conservação, com ações de eficiência energética implementadas.

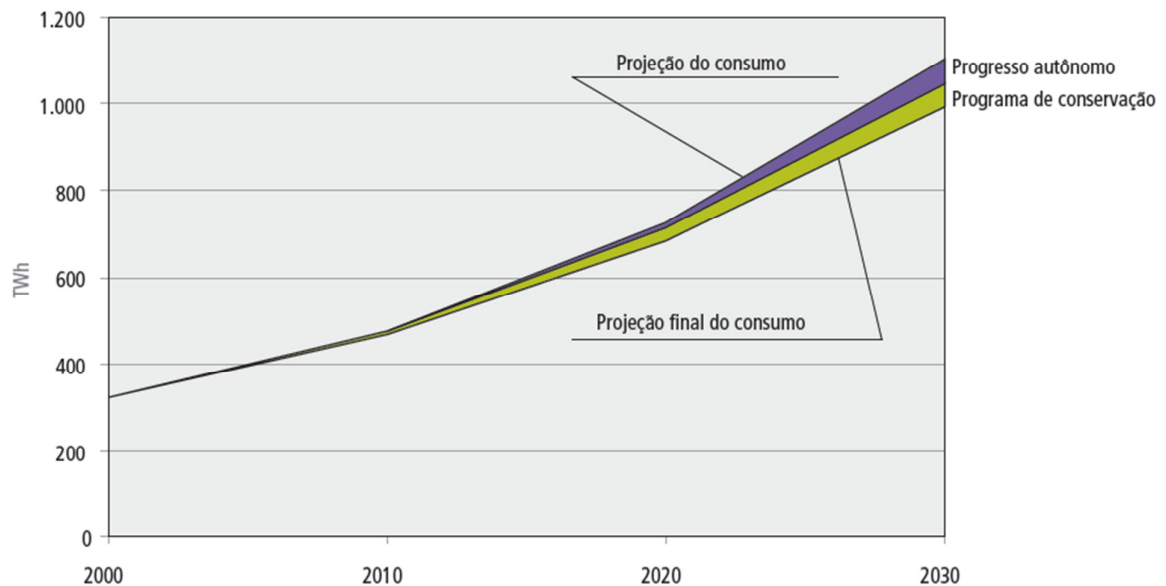


Figura 2: Consumo final de eletricidade com incidência simultânea do progresso autônomo e induzido

FONTE: PNE 2030

De acordo com Geller (2003) um sustentável futuro com energia é possível por meio de maior eficiência no uso desta. Com isso, haveria uma redução do crescimento do consumo de energia, uma diminuição da demanda de investimento e uma melhora dos serviços de energia para as famílias e para as nações mais pobres.

No setor de edificações, Lamberts *et al.* (1997) afirmam que um edifício é mais eficiente energeticamente que o outro quando proporciona as mesmas condições ambientais com menos consumo de energia.

Os programas de simulação computacional são ferramentas que podem ser utilizadas para se prever o desempenho térmico e energético das edificações, além

de estimar o consumo de alternativas de projeto como opções de desenho arquitetônico, componentes construtivos, sistema de iluminação ou sistema de condicionamento de ar (MENDES *et al.*, 2005).

Visando a necessidade de estimular no Brasil o uso de um programa de simulação termoenergético no processo de etiquetagem de eficiência energética em edifícios, desde 2009, em parceria com a Eletrobrás (Centrais Elétricas Brasileiras S.A), o programa Domus desenvolvido via PUC-PR está sendo aperfeiçoado pela equipe do Laboratório de Sistemas Térmicos (LST) para incorporação dos requisitos estabelecidos pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética em Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) e foi intitulado DOMUS – Procel Edifica.

O escopo desse projeto aborda a fase de testes para analisar a precisão dos resultados do programa Domus (versão beta 2011). Tal foi possível por meio de comparação com outro programa já reconhecido. A ferramenta utilizada para realizar a avaliação do atendimento aos parâmetros mínimos exigidos pelo RTQ-C foi o programa Energy Plus na versão 5.0. A escolha do Energy Plus se deu ao fato dele ser um programa que passou pela validação do BESTEST, da Standard 140 (ASHRAE, 2001), e de atender aos requisitos mínimos exigidos dos programas de simulação do RTQ-C além de ter sido o programa utilizado para gerar as equações do Índice de Consumo do RTQ-C.

Os testes foram realizados em um protótipo teste representativo de um edifício de escritório de pequeno porte e foram analisados alguns parâmetros exigidos pelo RTQ-C, como inércia térmica e multizona térmica, simulados nas 8760 horas do ano para a cidade de Belo Horizonte - MG.

1.2 Objetivos

1.2.1 Gerais

O objetivo desse trabalho é fazer uma avaliação comparativa do comportamento entre o programa Domus - Procel Edifica (versão Beta 2011) e o programa Energy

Plus (versão 5.0) quanto a alguns dos pré-requisitos específicos estabelecidos pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) para programas de simulação computacional.

1.2.2 Específicos

Com essa avaliação comparativa, espera-se alcançar outros objetivos específicos como:

- Avaliar os dados de entrada de dados dos dois programas
- Comparar o comportamento dos programas ao simular multizonas térmicas;
- Avaliar o comportamento dos programas em relação aos efeitos de inércia térmica;
- Comparar os ganhos e perdas de calor nas 8760 horas do ano por superfície nos dois programas;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica abordando os trabalhos semelhantes ao assunto dessa dissertação, como o regulamento de eficiência energética brasileira, simulação computacional e softwares de simulação termoenergética.

2.1 Regulamento Técnico da Qualidade para Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C

A política nacional de eficiência energética no Brasil tem um marco importante em outubro de 2001, quando foi sancionada a Lei nº 10.295 que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia que visa à alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente. Em dezembro do mesmo ano, o decreto nº 4.059 regulamenta a Lei nº 10.295 e estabelece os seguintes artigos:

Art. 1º Os níveis máximos de consumo de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no País, bem como as edificações construídas, serão estabelecidos com base em indicadores técnicos e regulamentação específica a ser fixada nos termos deste Decreto, sob a coordenação do Ministério de Minas e Energia.

Art. 2º Fica instituído Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética – CGIEE – composto por representantes dos seguintes órgãos e entidades: Ministério de Minas e Energia, Ministério da Ciência e Tecnologia, Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, Agência Nacional de Energia Elétrica, Agência Nacional do Petróleo, representante de Universidade Brasileira e cidadão brasileiro designado pelo Ministério de Minas e Energia.

Para que estudos fossem desenvolvidos, foi criado dentro do PROCEL (Programa Brasileiro de Conservação de Energia Elétrica) a vertente que trata especificamente das edificações, o PROCEL-EDIFICA. Entre suas principais ações consta o desenvolvimento do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência

Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos - RTQ-C (BRASIL, 2010a) e para Edifícios Residenciais - RTQ-R (BRASIL, 2010c).

2.1.1 Desenvolvimento das equações do RTQ-C

Para o desenvolvimento do RTQ-C, foram feitos protótipos representativos das edificações comerciais para que pudessem ser simulados. Primeiramente foi realizado um levantamento fotográfico de edifícios para que permitissem representar as características comuns das edificações brasileiras. Foram coletadas fotografias em cinco capitais brasileiras em cerca de 1103 amostras, divididas em sete tipos de atividades (Carlo, 2008).

A partir desse levantamento, foram desenvolvidos protótipos que ao serem simulados, foram desenvolvidas as equações para estabelecimento do nível de eficiência da envoltória do Método Prescritivo do RTQ-C através do método estatístico de regressão linear múltipla. Estes protótipos representavam edificações com diferentes características. Os modelos foram simulados com um sistema de condicionamento de ar do tipo de janela, com eficiência A ($COP=3,19$ W/W) e possuindo suas maiores fachadas orientadas para Norte e Sul. Além disso, foram adotados percentuais de área de janelas nas fachadas para cada tipo de atividade, o sistema de iluminação simulado com uma densidade de potência de 25 W/m² e o padrão de uso de 11 horas (Carlo, 2008). As dimensões, pés-direitos e número de pavimentos destes modelos estão apresentados na Tabela 1.

Assim, foram criadas duas equações baseadas na área de projeção da edificação (uma menor do que 500 m² e outra maior que 500 m²) para cada uma das 8 zonas bioclimáticas brasileiras. Os resultados dessas equações não demonstram o consumo de energia da edificação, mas o Indicador de Consumo da envoltória.

Tabela 1: Modelos representativos testados para o desenvolvimento do RTQ-C

Atividade comercial	ID	Num Pav	Dimensões (m)	Pé direito (m)	A_{total} (m ²)	Fator de Forma (A_{env}/V_{tot})	Fator Altura (A_{cob}/A_{tot})
Grande loja	1	1	44,5 x 67 x 5	5,0	2981,5	0,27	1,00
	2	2	44,5 x 67 x 10	5,0	5963,0	0,17	0,50
	3	5	44,5 x 67 x 25	5,0	14907,5	0,11	0,20
	4	10	44,5 x 67 x 50	5,0	29815,0	0,09	0,10
	5	25	44,5 x 67 x 125	5,0	74537,5	0,08	0,04
Escritório	6	1	7,5 x 27 x 2,6	2,6	202,5	0,73	1,00
	7	2	7,5 x 27 x 5,2	2,6	405,0	0,53	0,50
	8	5	7,5 x 27 x 13,0	2,6	1012,5	0,42	0,20
	9	10	7,5 x 27 x 26,0	2,6	2025,0	0,38	0,10
	10	15	7,5 x 27 x 39,0	2,6	3037,5	0,37	0,07
	11	25	7,5 x 27 x 65,0	2,6	5062,5	0,36	0,04
Pequena loja	12	1	6 x 10 x 3	3,0	60,0	0,87	1,00
	13	3	6 x 10 x 9	3,0	180,0	0,64	0,33
	14	5	6 x 10 x 15	3,0	300,0	0,60	0,20

Fonte: Carlo (2008)

2.1.2 O RTQ-C

Em julho de 2009, foi lançada no Brasil, o RTQ-C e o mesmo foi revisto em 17 de setembro de 2010 (Portaria nº372 do INMETRO). Esse Regulamento tem como objetivo “criar condições para a etiquetagem do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos” (BRASIL, 2010).

Esta etiqueta é de caráter voluntário para edificações novas e existentes, mas para que a edificação possa ser avaliada, ela deve atender alguns requisitos mínimos

para sua classificação: ter área total útil mínima de 500 m² e/ou com tensão de abastecimento superior ou igual a 2,3 kV (subgrupos A1, A2, A3, A3a, A4 e AS), incluindo edifícios condicionados, parcialmente condicionados e não condicionados.

De acordo com Carlo, 2008: “o consumo de energia é função de variáveis que utilizam diretamente a energia, assim como os sistemas de iluminação artificial, de equipamentos e de condicionamento de ar, e de outras variáveis que interferem nestes sistemas, como partes do envoltório da edificação e a forma de uso de tais sistemas consumidores de energia”. Assim, o RTQ-C foi desenvolvido avaliando os três itens: envoltória, iluminação artificial e condicionamento de ar. Todos os itens têm níveis de eficiência que variam de A (mais eficiente) a E (menos eficiente).

A etiqueta de eficiência energética pode ser fornecida para o edifício completo ou para parte dele (envoltória apenas ou esta conjugada com iluminação ou com condicionamento de ar). A avaliação da edificação pode ser feita por dois métodos: método prescritivo e método de simulação. O método prescritivo utiliza pré-requisitos e equações que resultam em parâmetros que devem alcançar valores determinados para cada nível da classificação. Já o método de simulação deve utilizar um programa computacional de simulação termo-energética que modele as variações horárias de todas as cargas térmicas da edificação subdivididas em multi-zonas considerando os efeitos de inércia térmica e tenha capacidade de simular as estratégias bioclimáticas adotadas no projeto. Os relatórios de uso da energia também serão utilizados para a análise e estabelecimento do nível classificação atingido. Pode ser utilizado para simular os sistemas individuais em combinação com o método prescritivo.

A avaliação das características da envoltória é, em geral, comum em todas as análises sobre eficiência energética de edificações, pois elas podem aumentar ou minimizar os ganhos de calor (CARLO, 2008). No método prescritivo, o item envoltória é avaliado por meio de um Índice de Consumo (IC) que é determinado de acordo com a Zona Bioclimática brasileira em que a edificação está inserida e esta é definida de acordo com a NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Na equação de IC são determinadas as variáveis da edificação como área de piso, abertura, área de envoltória, tipos de vidro, proteção solar e volume da edificação.

A iluminação artificial é classificada de acordo com a potência instalada no ambiente e pela área iluminada. Existem dois métodos de avaliação, o Método das Áreas, que é feito pela comparação da densidade de potência instalada no edifício (DPI [W/m²]) e a densidade de potência limite; e o Método das Atividades que é calculado pela soma das potências instaladas dos ambientes do edifício.

O sistema de condicionamento de ar é avaliado de acordo com o sistema instalado: condicionadores individuais (split ou janela) ou sistemas centrais. A eficiência dos dois sistemas deve ser comprovada de acordo com parâmetros de desempenho mínimos estabelecidos para cada nível de classificação.

A classificação geral do edifício pode ser obtida quando todos os sistemas individuais forem avaliados. A pontuação final é estabelecida considerando pesos que são distribuídos em 30% para envoltória, 30% para iluminação e 40% para o condicionamento de ar, calculada de acordo com a Equação 1. Além disso, a edificação pode receber até 1 ponto em bonificação pelo uso de equipamentos que racionalizem o consumo de água, sistemas de cogeração, inovações técnicas e sistemas ou fontes renováveis de energia (fotovoltaico, aquecimento solar, energia eólica).

$$PT = 0,30 \cdot \left\{ \left(EqNumEnv \cdot \frac{AC}{AU} \right) + \left(\frac{APT}{AU} \cdot 0,5 + \frac{ANC}{AU} \cdot EqNumV \right) \right\} + 0,30 \cdot (EqNumDPI) + 0,40 \cdot \left\{ \left(EqNumCA \cdot \frac{AC}{AU} \right) + \left(\frac{APT}{AU} \cdot 0,5 + \frac{ANC}{AU} \cdot EqNumV \right) \right\} + b_0^1$$

Equação 1

EqNumEnv: *equivalente numérico da envoltória;*

EqNumDPI: *equivalente numérico do sistema de iluminação*

EqNumCA: *equivalente numérico do sistema de condicionamento de ar;*

EqNumV: *equivalente numérico de ambientes não condicionados e/ou ventilados naturalmente;*

APT: *área útil dos ambientes de permanência transitória, desde que não condicionados;*

ANC: *área útil dos ambientes não condicionados de permanência prolongada, com comprovação de percentual de horas ocupadas de conforto por ventilação natural (POC) através do método da simulação;*

AC: área útil dos ambientes condicionados;

AU: área útil;

b: pontuação obtida pelas bonificações, que varia de zero a 1.

Toda edificação submetida à avaliação completa ou parcial, receberá uma Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE, como o da Figura 1, que indicará o desempenho geral obtido e o desempenho nos sistemas individuais.

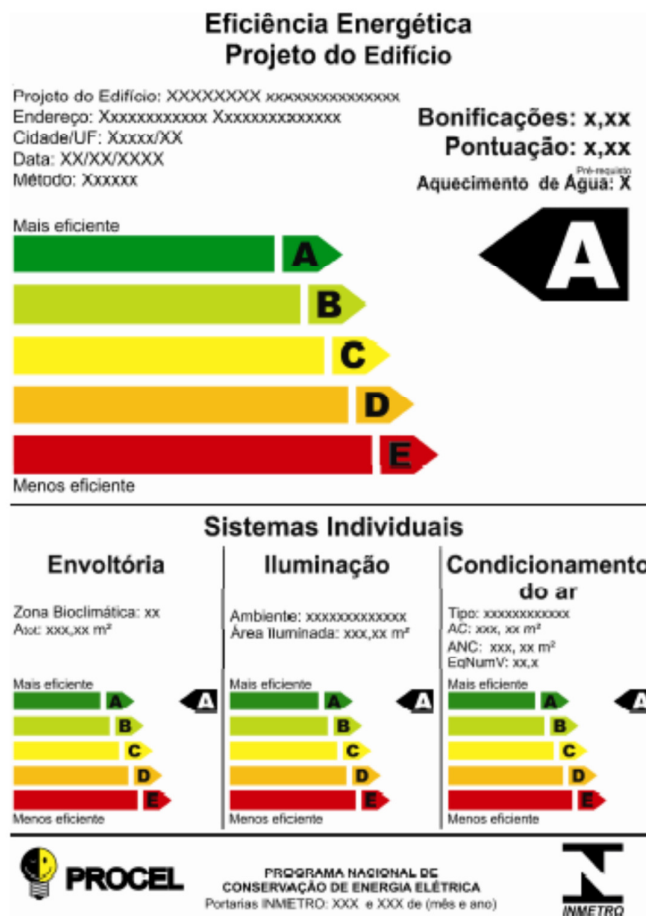


Figura 1: Etiqueta final de Classificação da Eficiência Energética do Edifício.

Fonte: BRASIL, 2010b

No RTQ-C também existe outro método para a classificação do edifício, o método de simulação. Segundo Carlo e Lamberts (2010) esse método é mais completo para qualquer análise do desempenho térmico e/ou energético do edifício, proporcionando flexibilidade nas opções que visam à racionalização do consumo de energia, o que inclui o processo de projeto. Por meio dele é possível avaliar as

estratégias bioclimáticas como ventilação natural, inércia térmica que poderão alcançar melhores níveis de eficiência energética do projeto.

Atendido aos pré-requisitos mencionados anteriormente, a avaliação é feita comparando o edifício real, de acordo com o projeto que está sendo proposto, com um edifício de referência, que é definido de acordo com o método prescritivo. Este modelo de referência deve possuir as mesmas características do modelo real como: a forma do edifício, o número de zonas térmicas, os padrões de uso e de ocupação e as cargas internas de equipamentos. Assim, compara-se o consumo anual de energia do edifício de referência com o real e este deve estar de acordo com o nível de eficiência energética que se pretende alcançar. O consumo de energia do edifício proposto deve ser igual ou menor ao consumo do edifício de referência para determinado nível de classificação.

Apesar do Regulamento Técnico não estabelecer um programa de simulação específico, ele define os requisitos mínimos que este deverá apresentar para que possa ser utilizado. São eles:

- ser um programa para a análise do consumo de energia em edifícios;
- ser validado pela ASHRAE Standard 140;
- modelar 8760 horas por ano;
- modelar variações horárias de ocupação, potência de iluminação e equipamentos e sistemas de ar condicionado, definidos separadamente para cada dia da semana e feriados;
- modelar efeitos de inércia térmica;
- permitir a modelagem de multizonas térmicas;
- para a pontuação total de edifícios totalmente simulados, deve ter capacidade de simular as estratégias bioclimáticas adotadas no projeto;
- caso o edifício proposto utilize sistema de condicionamento de ar, o programa deve permitir modelar todos os sistemas de condicionamento de ar listados no Apêndice G da ASHRAE 90.1;
- determinar a capacidade solicitada pelo Sistema de Condicionamento de Ar;
- produzir relatórios horários do uso final de energia.

Destes itens, o presente estudo de dissertação pretende avaliar os que se referem à modelagem dos efeitos da inércia térmica e das multizonas térmicas, modelados nas 8760 horas do ano.

O RTQ-C também exige que os arquivos climáticos utilizados para simular devem apresentar dados horários de temperatura e umidade, direção e velocidade do vento e radiação solar. Esses arquivos estão publicados no site de energia americano (www.eere.energy.gov) nos formatos TRY, TMY, SWEC e CTZ2. Caso não tenha esse formato, esse arquivo deverá ser aprovado pelo laboratório de referência.

2.2 – Simulação Computacional termoenergética de edificações

A simulação computacional é um instrumento importante para avaliar o desempenho térmico e energético de edificações para diferentes alternativas de projeto, sejam elas opções do desenho arquitetônico, componentes construtivos, sistemas de iluminação ou sistemas de condicionamento de ar. Com a simulação computacional, pode-se estimar o consumo de energia, o custo desse consumo e até mesmo o impacto ambiental provocado pela alternativa de projeto antes mesmo de sua execução (MENDES *et al.*, 2005).

Para que se obtenha um edifício eficiente não basta somente que o projeto seja eficiente, mas que haja uma integração entre edifício, sistemas, usuário e clima conforme mostrado na Figura 2. A multidisciplinaridade que envolve a simulação computacional abrange uma série de áreas profissionais cujo entendimento é necessário para modelar-se de forma adequada o comportamento do edifício. Este tipo de simulação permite prever-se a temperatura do ar interior, os níveis de iluminância dos ambientes, o consumo total de energia da edificação, entre outros.

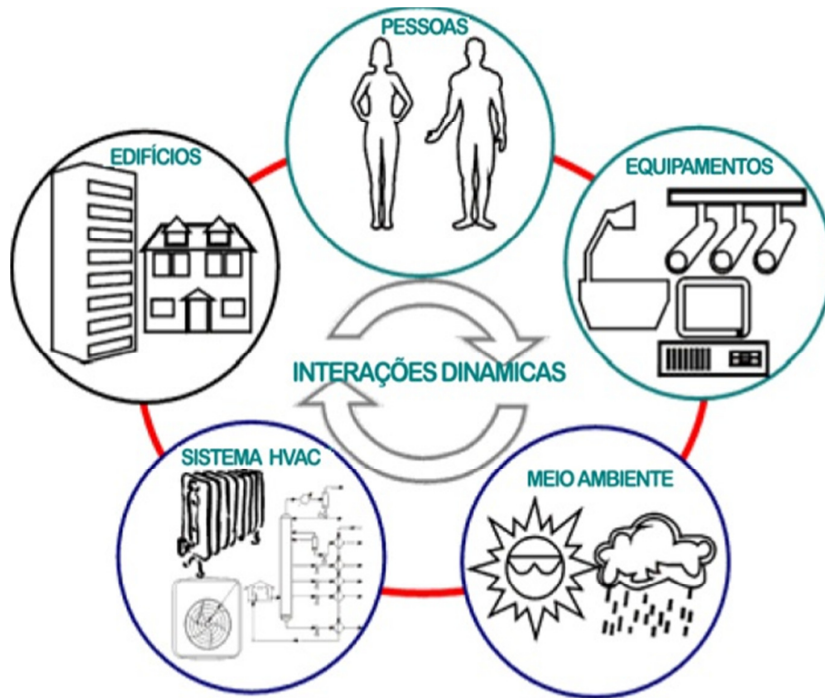


Figura 2: Interações dinâmicas de sub-sistemas de edifícios

Fonte: Hensen e Lamberts (2011)

2.2.1 Programas de simulação

2.2.1.1 EnergyPlus

Para que se possa fazer a análise comparativa pretendida nesse trabalho, foi adotado o Energy Plus, que é um programa de simulação termoenergética que tem suas raízes nos programas americanos BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) e DOE-2, desenvolvidos no final de 1970 e início de 1980 como ferramentas de simulação de energia e de carga térmica. Mantido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos – DOE – é utilizado em pesquisas e por projetistas que desejam saber do desempenho termoenergético nos edifícios.

O software é capaz de simular de forma integrada os componentes construtivos da edificação, sistemas de condicionamento de ar, equipamentos, padrões de uso e ocupação, entre outros, estimando o consumo de energia e considerando as trocas térmicas da edificação com o exterior (ENERGYPLUS, 2010).

A Figura 3 demonstra o gerenciamento do balanço de calor do Energy Plus, com um sistema de condicionamento de ar genérico utilizado no BLAST, representando seus módulos de transferência de calor, de fluxo de ar entre as zonas, de cálculo de energia solar térmica e de simulação de sistemas fotovoltaicos. O primeiro módulo é do balanço térmico que se integra com os modelos de céu, sombreamento, iluminação natural, janelas de vidro e com o cálculo das funções de transferência por condução. O segundo módulo simula ventilação natural e sistemas de condicionamento de ar. O último módulo é integrado ao software COMIS para modelar o fluxo de ar das multizonas (CRAWLEY *et al.*, 2000).

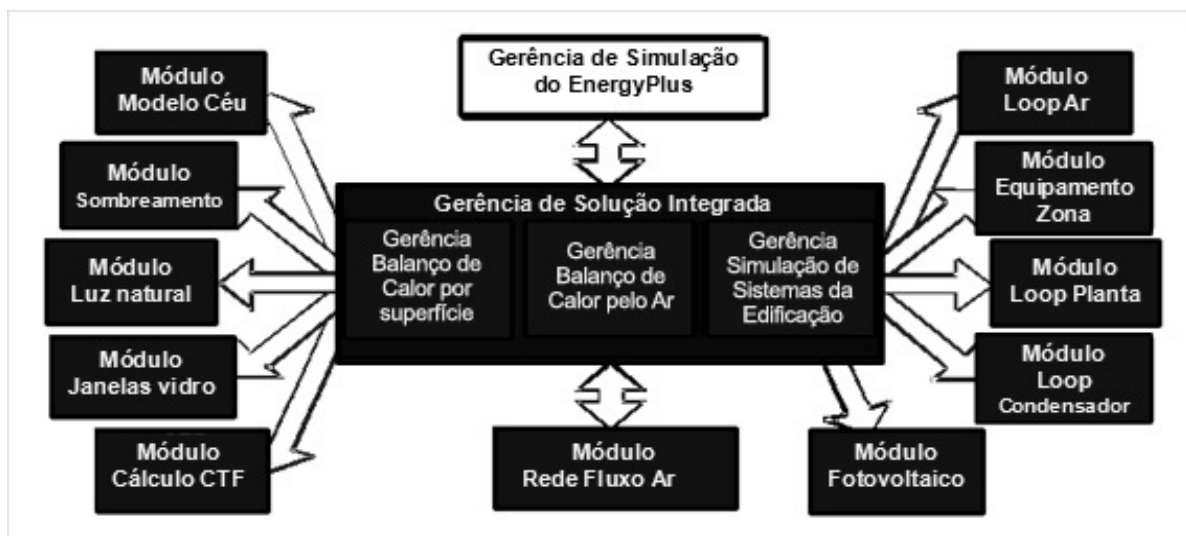


Figura 3: Simulação integrada do Energy Plus (ENERGYPLUS, 2010)

Fonte: adaptado de CRAWLEY (2000)

Para realizar a simulação termoenergética, o edifício é dividido em zonas térmicas, que são áreas com características térmicas semelhantes. Além disso, é necessária uma série de dados que descrevem o edifício analisado e os dados do clima, que são adquiridos nos arquivos climáticos da cidade ou da região com as mesmas características do local da edificação. Esse arquivo climático deve conter dados horários de temperatura, umidade relativa, ventos e radiação solar.

2.2.1.2 Domus

O Domus, desenvolvido a partir de 1998 pelo Laboratório de Sistemas Térmicos (LST) da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), é um software concebido para simular edificações compostas de múltiplos ambientes, modelando a transferência combinada de calor e de umidade em elementos porosos de forma a permitir análises de desempenho higrotérmico de elementos construtivos quando estão sujeitos a qualquer tipo de condição climática (SANTOS *et al.*, 2004). Ele incorpora as características do UMIDUS, que é um programa que modela transferência de calor e umidade em elementos construtivos porosos, o que permite a sua simulação higrotérmica (MENDES *et al.*, 1999).

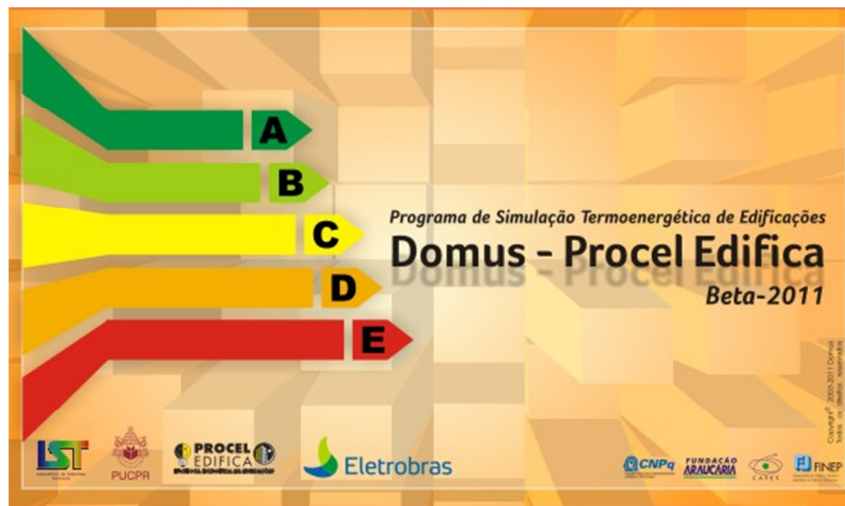


Figura 4: Janela de apresentação do Domus

Fonte: Domus - Procel Edifica 2011

O programa Domus permite a caracterização dos protótipos quanto aos seus componentes construtivos, às cargas de iluminação e de ar condicionado e a seus padrões de uso, seus equipamentos, à quantidade de usuários e suas rotinas de uso, conforme demonstrado na Figura 5. Para isso, devem-se configurar os parâmetros de simulação, com o arquivo climático estabelecido pelo Domus, na extensão dwf (Domus Weather File), e os intervalos de simulação necessários. Esses arquivos são gerados com um conversor de arquivos, o Weather Converter, que converte arquivos no formato TMY, TMY2, TRY e EPW para o formato DWF.

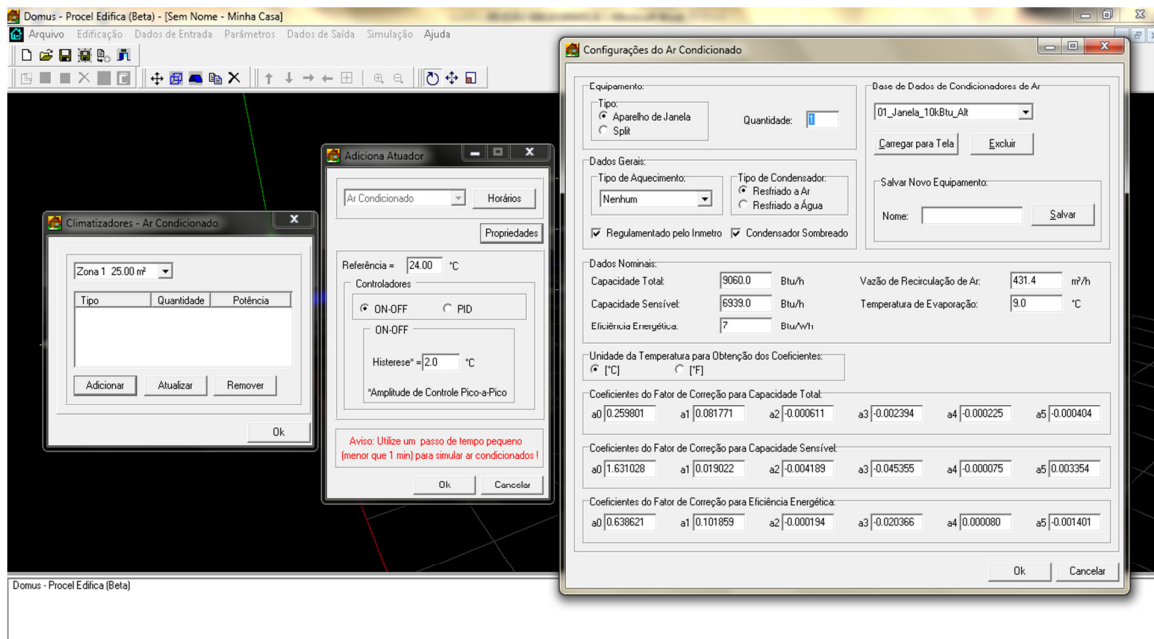


Figura 5: Visualização do Domus na caracterização do ar condicionado de expansão direta

Fonte: Domus (2011)

O usuário pode solicitar relatórios de saída em forma de gráficos e de estatísticas mensais e anuais para cada zona de conforto térmico como: temperatura interna, umidade relativa, Voto Médio Previsto (*Predicted Mean Vote – PMV*) e Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (*Predicted Percentage of Dissatisfied - PPD*), sensação térmica de acordo com a ASHRAE, percepção da qualidade do ar e de conforto nos ambientes naturalmente ventilados. Além disso, fornece dados de energia (ganhos térmicos e demanda de consumo de energia) e perfil de temperatura e umidade, fluxo de calor e de vapor e as radiações direta, difusa e refletida de cada parede. No Sistema de Climatização, são fornecidos dados de carga térmica. A tela gráfica onde estas saídas são solicitadas é apresentada na Figura 6.

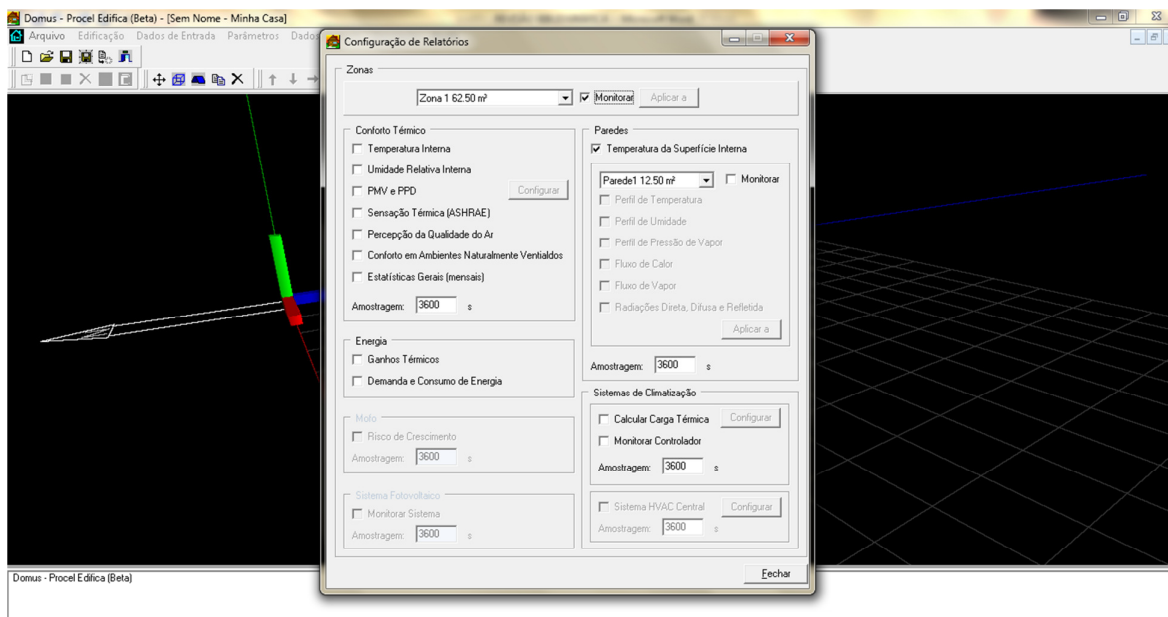


Figura 6: Visualização da tela onde são solicitados os dados de saída do Domus

Fonte: Domus (2011)

Além dos gráficos para a avaliação qualitativa, o programa ainda apresenta um relatório dos resultados obtidos em modo texto, possibilitando a análise quantitativa dos resultados e a exportação para tabelas.

Para atender aos requisitos de análise do RTQ-C, o programa incorporou em sua estrutura uma DLL (Dynamic Link Library) criada a partir das equações do método prescritivo do Regulamento Técnico. Em uma primeira fase, essa DLL fará a análise pelo método prescritivo, a partir do protótipo configurado pelo usuário. Ao se configurar os componentes construtivos, o sistema de iluminação e condicionamento de ar no protótipo, a DLL é alimentada e assim, as etiquetas parciais e a geral são geradas de acordo com os requisitos estabelecidos pelo RTQ-C. A Figura 7 abaixo demonstra a estrutura do programa Domus. A parte relativa à DLL para atendimento ao RTQ-C aparece na parte direita inferior.

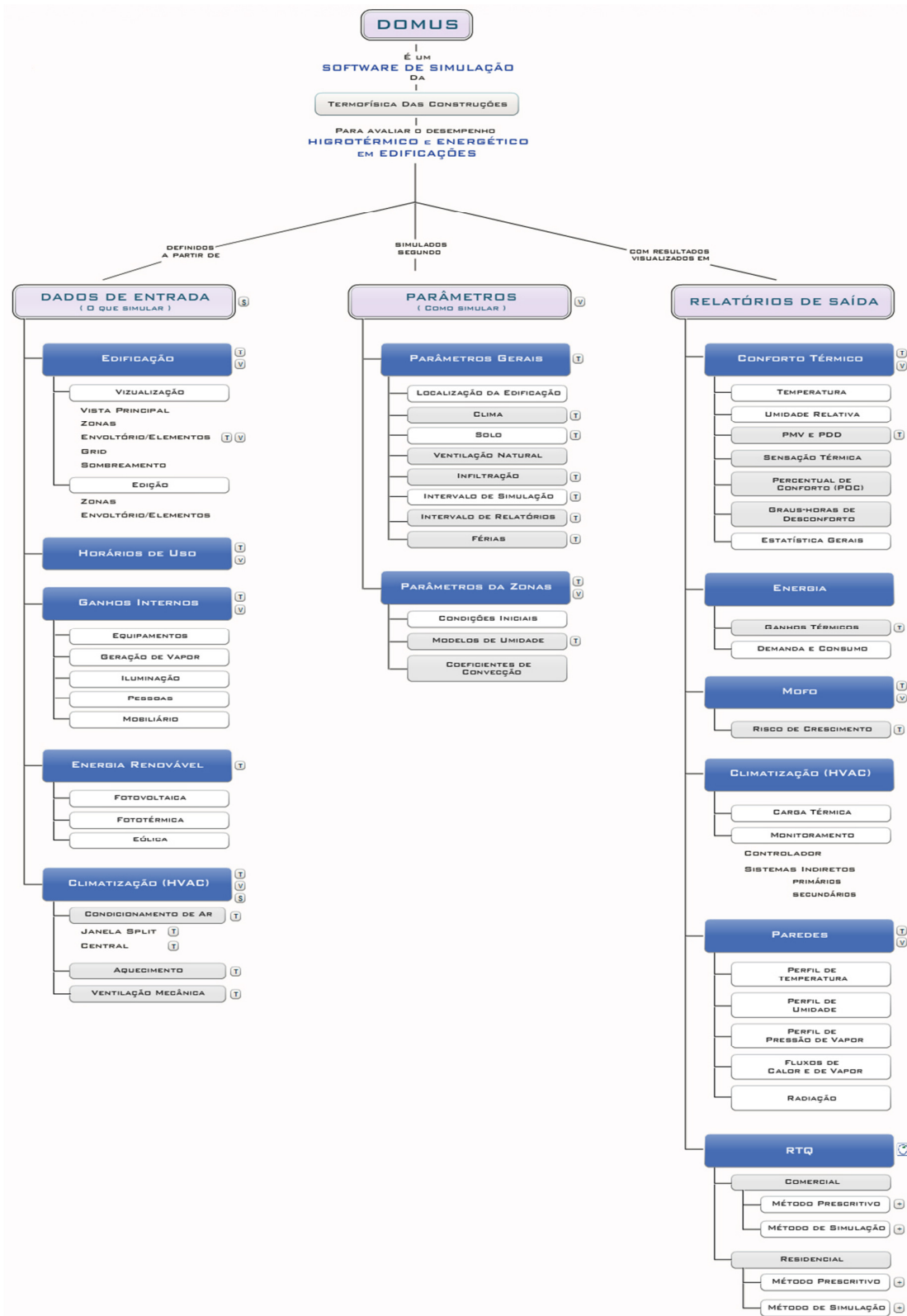


Figura 7: Organograma do programa Domus
Fonte: Domus (2011)

2.2.2 Validação do programa Domus

Para que o programa demonstre confiabilidade nos resultados, ele passou por validações experimentais e analíticas, além de verificações segundo a norma ASHRAE 1052-RP Toolkit – Building Fabric Analytical Tests e ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 – Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests. O primeiro teste foi realizado para avaliar a capacidade do programa na análise de transferência de calor por meio da análise de convecção e condução, ganhos solares e de sombra, infiltração, radiação de onda longa e ganhos internos. O Gráfico 3, mostra um exemplo desse teste com radiação solar incidente nas superfícies opacas, onde mostra-se o ajuste perfeito entre as curvas teóricas e aquelas fornecidas pelo Domus (ABADIE, 2011).

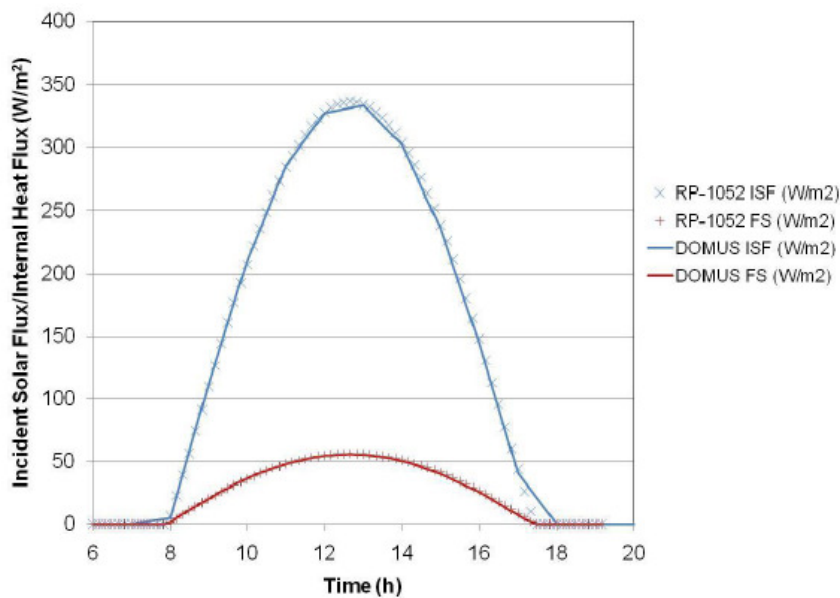


Gráfico 3: Fluxo solar incidente e fluxo de calor interno na parede orientado para sul no protótipo base – comparação dos resultados fornecidos pelo Programa Domus e pelo teste RP-1052 ISF

FONTE: ABADIE, 2011

Já a validação da ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 – Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests traz testes comparativos entre os programas de simulação. O objetivo dos testes é identificar e diagnosticar as diferenças nas simulações que podem ter sido causadas por erros nos programas de simulação com grau alto ou baixo de complexidade. Os testes foram feitos com materiais pesados e leves (Case

600/900), sombreamento (Case 610/910), orientação das aberturas (Case 620/630/920/930), termostato (Case 640/940), ventilação noturna (Case 650/950) e aquecimento passivo (Case 960) (ABADIE, 2010). Um dos resultados desses testes está exemplificado no Gráfico 4 e pode-se verificar que os resultados dos testes com o Domus (em vermelho) se aproximam muito de outros programas de simulação reconhecidos e testados internacionalmente.

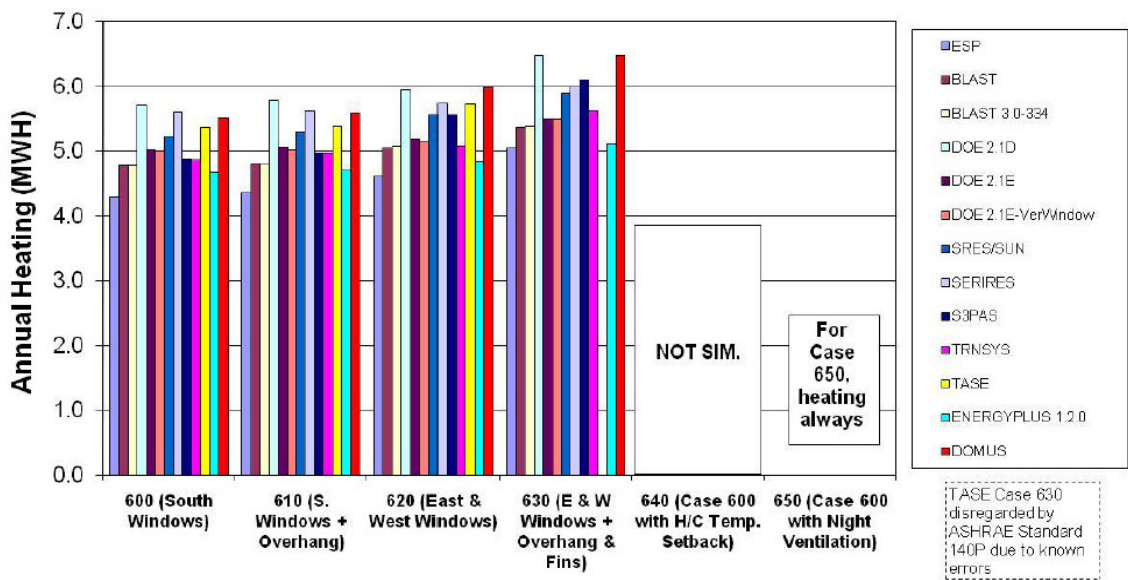


Gráfico 4: Teste de aquecimento anual em construção com massa leve. Comparação dos resultados fornecidos pelo Programa Domus e pelos programas ESP, Blast, Doe, Sres, S3pas, Trnsys, Tase e Energy Plus 1.2.0

Fonte: ABADIE, 2010

2.2.3 Validação de programas de simulação

Para se obter uma adequada precisão em simulação, Thumann e Younger (2003) afirmam que esta deve ser fundamentada em três pontos principais: a compreensão da ferramenta de simulação a ser utilizada, incluindo seus códigos e algoritmos; a compreensão do edifício que está sendo simulado, e suas características físicas e operacionais; e a análise crítica dos dados de saída.

Narciso Filho (1993) realizou a avaliação do funcionamento do programa Casamo-Clim fazendo uma análise comparativa de alguns resultados com outro programa, o Comfie. Através dessa pesquisa foram realizadas simulações em que foram encontradas falhas de funcionamento do programa que poderiam comprometer os resultados obtidos. Foram feitas análises de sensibilidade em relação aos aspectos de ventilação e de ganhos térmicos através das áreas envidraçadas de um modelo padrão de uma casa popular de 31m² sem divisões internas. O autor encontrou que o programa Casamo-Clim, responde bem aos aspectos de inércia térmica e sombreamento, mas apresenta subestimação das temperaturas máximas internas.

Rauber e outros (1993) utilizaram esse mesmo modelo de casa popular para comparar três outros programas: o ARCHIPAK (versão 1.0), THEDES (versão 3.0) e ARQUITROP (versão 3.0) e verificar os possíveis problemas da interface programa – usuário. Para que pudessem ser comparados, alguns parâmetros de entrada nos programas tiveram que ser adaptados para atender aos limites de cada um. Os resultados apresentados mostram que as maiores diferenças ocorreram nas temperaturas internas e nos fluxos de calor. Já a interface programa – usuário mostrou um bom resultado entre os usuários que fizeram os testes. No entanto, não foi possível comprovar a precisão dos programas somente com esses resultados porque não existiam dados medidos para a comparação.

No projeto PASSYS da Comunidade Europeia, Jensen (1995) descreve uma metodologia de validação de programas de simulação de forma a contemplar a avaliação de códigos complexos. Nos procedimentos de validação foram necessários diversos testes, como de sensibilidade e validação empírica, códigos utilizados e outros com diversas combinações conforme mostrado na Figura 8. Estes procedimentos foram necessários para aumentar a confiança nos programas de simulação.

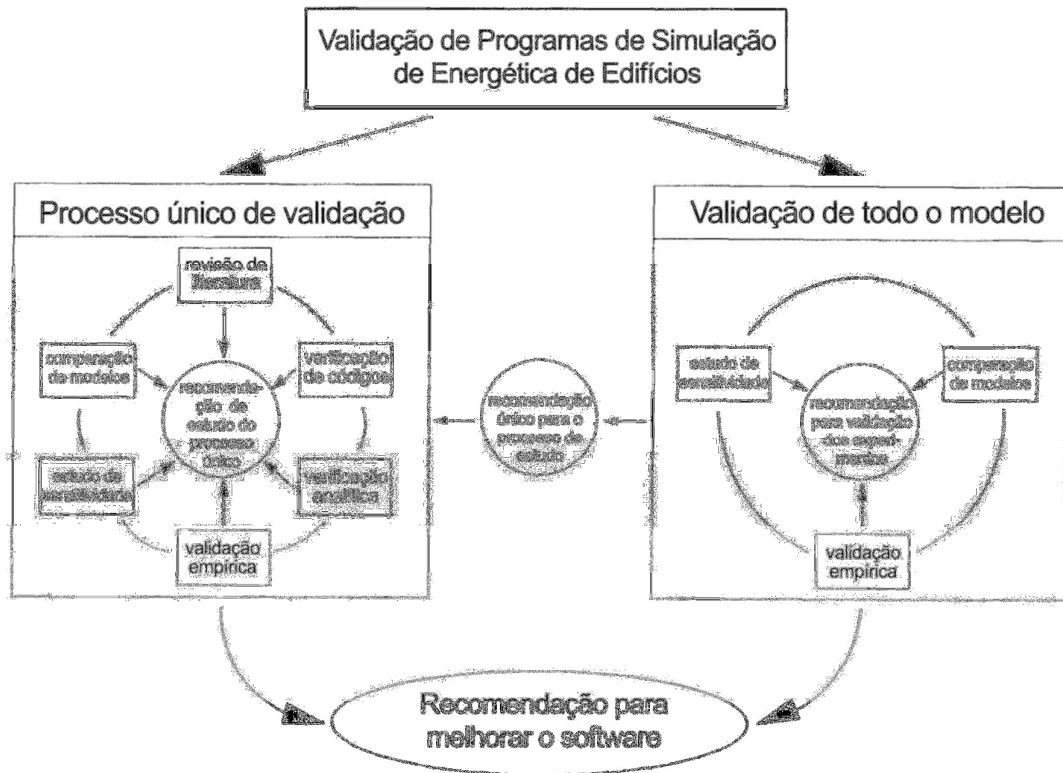


Figura 8: O princípio da metodologia de validação do modelo PASSYS

Fonte: Jensen (1995)

Crawley *et al.* (2000) desenvolveram outras formas de análise comparativa de programas de simulação em relação a análise de consumo de energia. Esses testes foram desenvolvidos com o Energy Plus em relação aos programas DOE-2, BLAST, TRNSYS e ESP. Eles foram necessários para detecção de *bugs* e confirmação do funcionamento correto dos algoritmos. Os testes desenvolvidos foram:

- Analíticos, que compararam os resultados obtidos com cálculos matemáticos;
- Comparativos, que compararam os resultados de *softwares* diferentes;
- Sensibilidade, que compararam o resultado de alterações efetuadas nos dados de entrada;
- De faixa, que rodaram o programa com vários dados de entrada;
- Validação, que compararam os resultados com dados experimentais.

Com o objetivo de se comparar os resultados das simulações de vários programas de simulação em relação ao comportamento térmico real de uma edificação, o

Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT (2004) apresentou vários critérios de avaliação no projeto “Validação de softwares aplicativos para simulação do comportamento térmico de habitações”. Esses critérios abrangeram as atividades de seleção dos softwares, detalhamento do método de validação, treinamento no uso dos softwares, planejamento das medições, especificação e compra de equipamentos, realização das medições, realizações das simulações, análise dos resultados das simulações em função dos dados medidos e apresentação das conclusões. Foram selecionados cinco softwares (NBSLD, BLAST, DOE-2, ESP-r, Energy Plus) com a meta de gerar resultados da simulação próximos aos dados medidos, quando utilizados por usuários qualificados. Assim, para efetivar a validação, foi necessário:

- Definição de três protótipos de edificações com características comuns à maioria das habitações de interesse social no Brasil;
- Medição de parâmetros que compõem os dados de entrada e saída dos softwares selecionados, incluindo aqueles referentes ao clima;
- Realização de simulações do comportamento térmico dessas edificações com dados climáticos medidos;
- Comparação dos resultados medidos e simulados.

Assim, foram medidas grandezas referentes ao clima (radiação solar global incidente em superfície horizontal, temperatura de bulbo seco, velocidade dos ventos) e referentes aos ambientes (temperatura de bulbo seco interior, de globo, superficial interna e externa das paredes, piso e cobertura, velocidade do ar interior e taxa de infiltração interior). Já nas simulações foram utilizados dados climáticos medidos no local.

Os resultados mostram que o programa BLAST possui uma boa concordância entre os valores medidos e calculados de temperatura do ar interior em um dos protótipos. Já no outro, houve uma minimização das perdas de calor através das paredes do ambiente. Na simulação com o programa ESPr houve grandes diferenças entre os valores medidos e simulados em relação à temperatura do ar interior. Isso ocorreu devido à limitação do programa na entrada de dados de radiação solar. Já o Energy Plus apresentou uma boa concordância entre os dados medidos e simulados, isso devido ao refinamento dos modelos matemáticos do programa.

Buoro *et al.* (2006) utilizaram a mesma metodologia utilizada pelo IPT (2004) para testar os mesmos protótipos em um programa diferente, o TAS. Esse programa é muito utilizado na Europa em escritórios de projeto bioclimático e tem como ponto forte a realização de balanços de trocas térmicas de vários ambientes simultaneamente. Os testes foram feitos comparando o TAS com o EnergyPlus e verificou-se uma boa concordância em relação à temperatura do ar interior principalmente nos horários em que as temperaturas estão mais elevadas. Já as trocas de calor por onda longa no interior do ambiente levaram a uma subestimação da componente radiante no balanço de energia das vedações e a uma superestimação da componente convectiva, resultando em valores diferentes de inércia térmica da edificação.

A ASHRAE Standard 140 - *Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs* especifica um método de avaliação para verificar programas de simulação termoenergético, intitulado como BESTEST (ASHRAE, 2001). Este é utilizado para diagnosticar o comportamento dos programas em relação aos dados de entrada e verificar a ocorrência de erros devido a eventuais problemas de codificação. Nele são apresentados 40 casos e as variáveis testadas são: massa térmica, ganho de calor através de radiação solar direta, sombreamento nas janelas, ventilação noturna, infiltração, ajuste da temperatura de controle do condicionador de ar, ganhos do solo. Todas essas variáveis são testadas em um protótipo básico que pode ser visto na Figura 9.

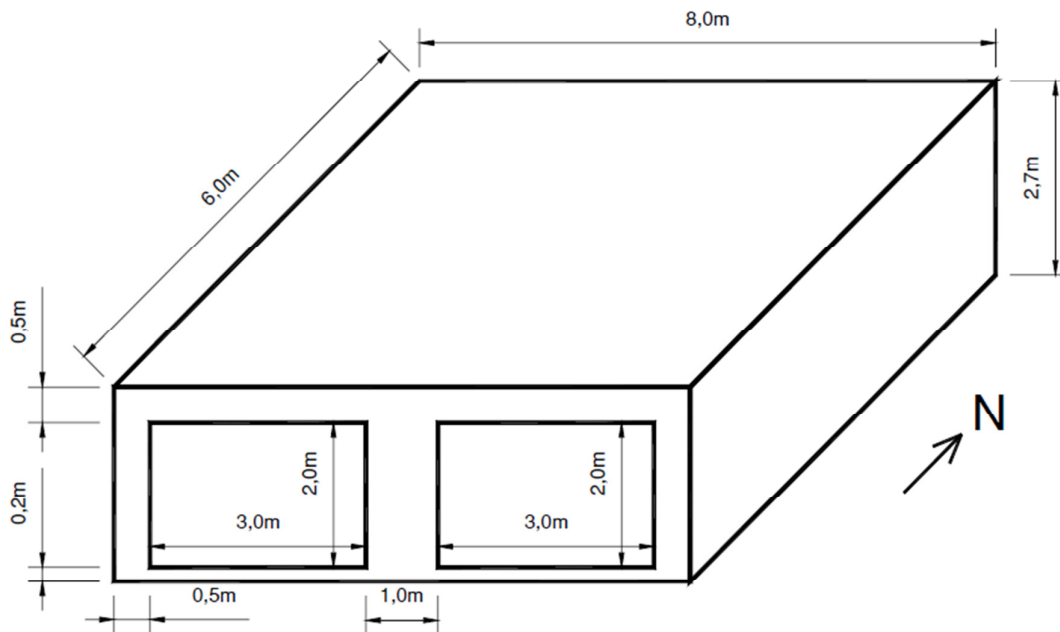


Figura 9: Representação gráfica do protótipo base para simulação da ASHRAE Standard 140
 Fonte: ASHRAE Standard 140 (2001)

A validação pelo BESTEST ajuda a revelar *bugs*, algoritmos com defeito ou problemas de documentação que podem levar erros de entrada e nos resultados finais. O uso de programas com essa validação traz confiabilidade na calibração dos resultados obtidos.

2.3 Indicadores de desempenho de modelos

Para determinar a precisão dos modelos simulados nos programas Energy Plus e Domus foram utilizados indicadores estatísticos de desempenho dos modelos: o desvio médio MDB (Mean Bias Deviation) e o desvio quadrático médio RMSD (Root Mean Square Deviation).

O MDB indica a tendência do modelo à subestimação (valores negativos) ou à superestimação (valores positivos), sendo o valor zero o valor ideal. Já o RMSD oferece a medida dos valores preditos pelos modelos em reação aos valores medidos. Seus valores sempre serão positivos e quanto mais próximos a zero, maior

a precisão do modelo. As equações que expressam esses indicadores são dadas a seguir:

$$MDB = \frac{\sum(y_i - x_i)}{\sum\left(\frac{x_i}{n}\right)} \quad \text{Equação 2}$$

$$RMSD = \frac{\sqrt{\sum(y_i - x_i)^2}}{\sum\left(\frac{x_i}{n}\right)} \quad \text{Equação 3}$$

Onde y_i é o valor estimado, x_i é o valor medido e n é o número de medidas consideradas. Para esse trabalho, considerou o valor de y_i , o obtido pelas simulações no Domus, x_i é o valor obtido pelas simulações no Energy Plus.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo consta a metodologia adotada para a realização dos procedimentos na preparação dos modelos computacionais para os testes comparativos entre o programa Domus, na versão Beta 2011 e Energy Plus na versão 5.0, além do tratamento dos dados e análise dos resultados simulados.

Os modelos de teste foram utilizados para comparar dois programas de simulação e verificar o comportamento térmico dos protótipos sob determinadas condições. Com isso foram propostos três tipos de testes para avaliar esse desempenho.

A metodologia deste trabalho foi dividida em duas etapas, a primeira da escolha do protótipo base e definição dos modelos de teste e a segunda da escolha dos testes e a simulação e análise do comportamento dos modelos.

A primeira etapa foi à escolha do protótipo base, feita através do estudo desenvolvido por Carlo e Lamberts (2006), que fizeram um levantamento de edificações brasileiras e chegaram a alguns modelos representativos que então foram simulados em relação ao seu desempenho térmico e consumo de energia. Para essa pesquisa foi escolhido o protótipo que representasse um edifício de escritórios de porte médio. Nesta fase foram definidos quatro protótipos.

A segunda etapa consiste na fase de desenvolvimento das simulações computacionais e análise dos resultados destes quatro protótipos. As simulações foram feitas para a cidade de Belo Horizonte, para a qual foi utilizado o arquivo climático TRY da cidade em questão, disponível no site do DOE (www.eere.energy.gov). Uma visão global da metodologia utilizada pode ser observada no diagrama da Figura 10.

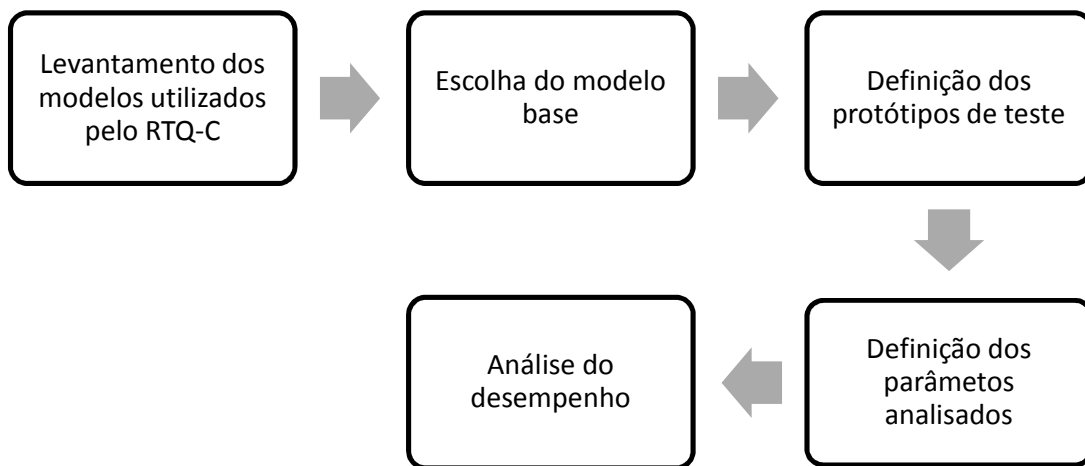


Figura 10: Fluxograma esquemático da metodologia adotada

3.1 Definição do modelo base

Para a análise experimental foi definido um dos modelos representativos definidos para o desenvolvimento do RTQ-C e visto no item 2.1.1 - ID 8, que caracteriza um edifício de escritórios de pequeno porte, como pode ser visto na Figura 11. O modelo foi definido por ser representativo de edifícios de pequeno porte, por atender as especificidades de dimensões máximas aceitáveis no programa Domus (que são 50x50x50m [Largura x Comprimento x Altura]) e por ser um modelo em que poderiam ser testados os pré-requisitos estabelecidos pelo RTQ-C.

O modelo base é composto por 05 pavimentos de andares corridos e sem divisórias internas. Cada pavimento foi definido por um prisma retangular com dimensões de 7,50 de largura, 27 de comprimento e 2,6 de altura, com área total de 202,50 m². As aberturas foram orientadas como no modelo experimental do RTQ-C, para Norte e Sul e suas dimensões tem o padrão retangular de 1,45m de altura por 26 de comprimento. Estas aberturas foram modeladas com área 100% envidraçada. O modelo possui 1012,50 m² de área total.

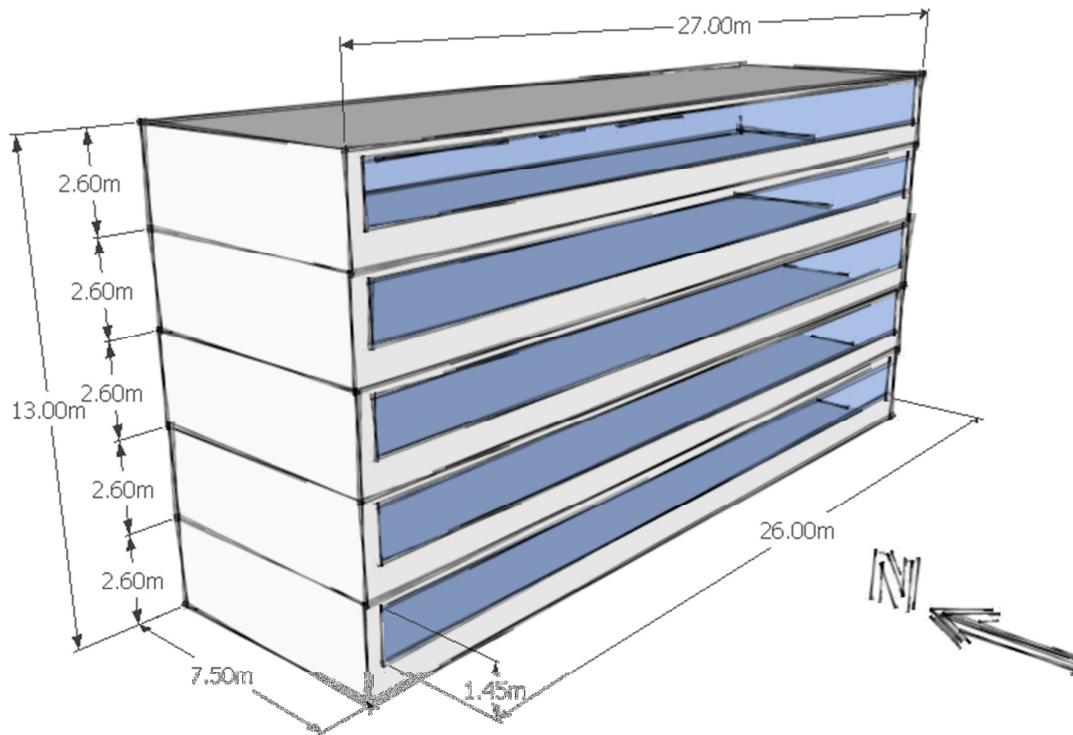


Figura 11: Desenho representativo do modelo base

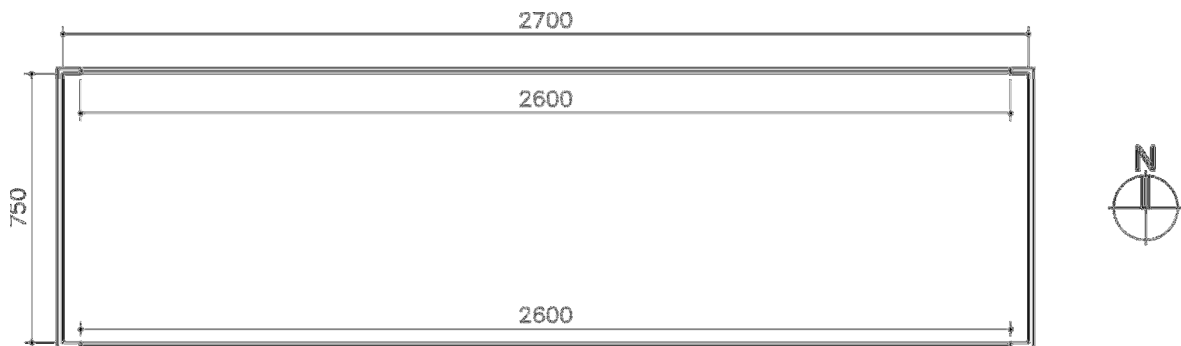


Figura 12: Planta baixa do modelo base

As propriedades térmicas da construção das paredes e coberturas foram definidas com base nos materiais típicos utilizados em edificações brasileiras, mas foram entradas nos programas como um material único de forma a minimizar possíveis diferenças no cálculo de transmissividade térmica entre os dois programas em análise. Os dados técnicos foram retirados da base de dados do programa Domus.

As características dos materiais e a forma de entrada dos dados dos dois programas estão listadas na Tabela 2 e na Tabela 3. Os sistemas de iluminação, equipamentos, padrões de uso e ocupação, ventilação natural e condicionamento de ar não foram considerados nesse trabalho.

Tabela 2: Características do material utilizado nas paredes

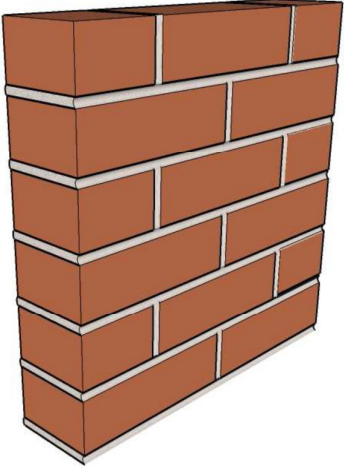
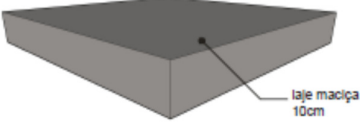
<p>PAREDES: TIJOLO</p> 	DOMUS	<ul style="list-style-type: none"> • Massa específica_MP = 1900.0 Kg/m³ • Porosidade = 0.29 • Calor Especifico = 920.0 J/Kg.K • Condutividade Térmica Cte = 0.749 W/m.K • Tabela Isotermas = 500 • Granularidade Isotermas = 0.002 • Arquivo Dados = Tijolo.mat • Arquivo Isotermas = TijoloISO.mat • Função Isotermas = 0 • Absortividade: 0.5 • Emissividade: 0.90
	ENERGY PLUS	<ul style="list-style-type: none"> • Espessura: 0,1m • Condutividade: 0.749 W/m.K • Massa específica: 1900 Kg/m³ • Calor específico: 920 J/Kg.K • Absortância Térmica: 0,9 • Absortância Solar: 0,5 • Absortância Visível: 0,5

Tabela 3: Características dos materiais utilizados no teto e no piso

<p>PISO E COBERTURA: LAJE MACIÇA</p>  <p>laje maciça 10cm</p>	DOMUS	<ul style="list-style-type: none"> • Massa específica_MP = 2200.0 Kg/m³ • Porosidade = 0.5 • Calor Especifico = 1000.0 J/Kg.K • Condutividade Térmica Cte = 1.75 W/m.K • Tabela Isotermas = 500 • Granularidade Isotermas = 0.002 • Arquivo Dados = Bloc_Con.mat • Arquivo Isotermas = Bloc_ConISO.mat • Função Isotermas = 0 • Absortividade: 0.25 • Emissividade: 0.90
	ENERGY PLUS	<ul style="list-style-type: none"> • Espessura: 0,1m • Condutividade: 1,75 W/m.K • Massa específica: 2200 Kg/m³ • Calor específico: 1000 J/Kg.K • Absortância Térmica: 0,9 • Absortância Solar: 0,25 • Absortância Visível: 0, 9

Nas aberturas o tipo de entrada de dados dos vidros dos dois programas é diferente. O Domus exige uma série de dados de entrada de absortividade, transmissividade e transmissividade do sistema duplo para vários tipos de ângulos que são necessários para a caracterização do material. Como o Energy Plus não necessita desses dados utilizou-se somente a espessura e emissividade comum aos dois programas e o restante utilizou-se com o *default* do programa. Os dados de entrada exigidos pelos dois programas estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Características do material especificado para simulação das superfícies envidraçadas nos programas Domus e Energy Plus

DOMUS	
ENERGY PLUS	<ul style="list-style-type: none"> • Espessura: 0,003048 m • Condutividade: 0,9 W/m.K • Transmitância Solar com Incidência Normal (Solar Transmittance at Normal Incidence): 0,837 • Refletância Solar com Incidência Normal externa e interna (Front and Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence): 0,075 • Transmitância Visível com Incidência Normal (Visible Transmittance at Normal Incidence): 0,898 • Refletância Solar com Incidência Normal externa e interna (Front and Back Visible Reflectance at Normal Incidence): 0,081 • Transmitância ao Infravermelho em Incidência Normal (Infrared Transmittance at Normal Incidence): 0 • Emissividade hemisférica ao infravermelho externa e interna (Front and Back Side Infrared Hemispherical Emissivity): 0,84

3.2 Protótipos de teste

Para que se pudessem testar alguns dos pré-requisitos estabelecidos pelo RTQ-C para programas de simulação, modificaram-se determinados parâmetros do modelo base e foram estabelecidos quatro protótipos teste para fazer as análises propostas.

Os protótipos foram simulados tanto no Domus quanto no Energy Plus e possuíram as mesmas características nos dados de entrada dos programas.

Nos protótipos foram eliminados a entrada de sistemas de iluminação, ventilação natural, condicionamento de ar, equipamentos e padrões de uso e ocupação. A orientação solar de todos os protótipos foi à mesma, considerando as maiores fachadas orientadas para Norte e Sul. Em seguida apresenta-se, a descrição dos protótipos propostos e na Figura 13, a imagem deles:

1. *MONOZONA SEM JANELA*: Modelo com uma única zona térmica com dimensões de 27x7,5x2,6m, com uma área construída de 202,50m²;
2. *MONOZONA COM JANELA*: Modelo com uma única zona térmica, como o da monozona sem janela, com a diferença da existência das janelas nas orientações norte e sul, com dimensões de 1,45x26m cada;
3. *MULTIZONA SEM JANELA*: Modelo com cinco zonas térmicas verticais, com 1 pavimento térreo, 3 pavimentos tipo e 1 cobertura. A edificação possui 27x7,5x2,6m, resultando em uma área total construída de 1.002,50m², a qual não é condicionada e nem ventilada naturalmente.
4. *MULTIZONA COM JANELA*: Modelo com cinco zonas térmicas verticais, como o da multizona sem janela, com a diferença da existência das janelas nas orientações norte e sul com dimensões de 1,45x26m cada;

Os protótipos teste não foram colocados em contato com o solo, pois a temperatura do solo mostrou ter significativa influência nos cálculos de carga térmica do programa Domus. Em virtude dessa influência, o protótipo foi colocado um metro acima do solo.

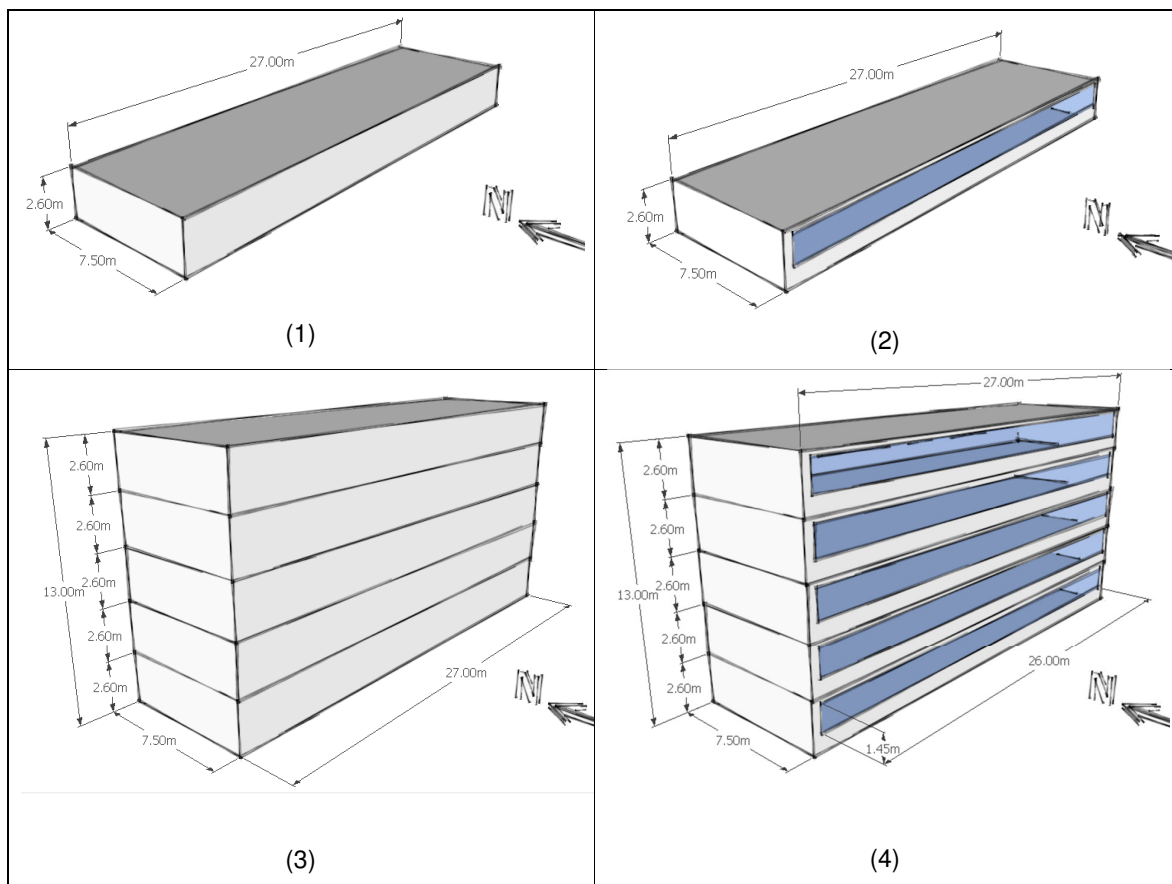


Figura 13: Modelos testes – (1) Monozona sem janela; (2) Monozona com janela; (3) Multizona sem janela; (4) Multizona com janela

3.3 Parâmetros analisados

Para comparar o desempenho do programa Domus em relação ao programa Energy Plus, alguns parâmetros foram escolhidos. Estes parâmetros foram definidos de acordo com os pré-requisitos colocados para os programas de simulação do RTQ-C (BRASIL, 2010a):

1. Modelar os efeitos de inércia térmica;
2. Permitir a modelagem de multi-zonas térmicas;
3. Modelar as 8760 horas por ano.

Para a simulação dos protótipos utilizou-se o arquivo climático da cidade de Belo Horizonte do tipo TRY (*Typical Reference Year*) que foi desenvolvido por Pereira

(2004), o qual se baseia nos dados da estação meteorológica convencional do INMET/5DISME.

Foram comparados os seguintes parâmetros nas simulações realizadas:

1. Temperatura interna dos ambientes: por meio de dados horários estabeleceram-se médias anuais de temperatura interna;
2. Graus hora de resfriamento e de aquecimento: através do arquivo climático de Belo Horizonte, foi calculado o total de graus horas de aquecimento e de resfriamento para as zonas térmicas, adotando-se as temperaturas limites internas de 18°C (aquecimento) e 24°C (resfriamento), os mesmos valores estipulados nos parâmetros de desenvolvimento das equações do RTQ-C de acordo com Carlo (2008);
3. Carga térmica advinda de superfícies opacas e translúcidas: através das características dos materiais utilizados, foram solicitadas as cargas térmicas por superfícies para se verificar as diferenças entre os ganhos térmicos nos programas analisados.

3.4 Análise de desempenho

Para a análise dos resultados das simulações foram solicitados como relatórios de saída tanto no programa Domus como no Energy Plus os valores horários de temperatura interna, temperatura externa e o de fluxo de calor por área (no Energy Plus, Surface Int Convection Heat Rate per Area [W/m^2]). Com isso, os resultados são apresentados através de análises comparativas das simulações realizadas ao longo de todo o ano em forma de gráficos de temperatura interna e graus hora de resfriamento e aquecimento, além dos ganhos térmicos por superfície. Os graus

hora de resfriamento e aquecimento foram calculados a partir da temperatura do ar interna dos dois programas¹.

Todos os itens a serem avaliados são apresentados em relação ao seu comportamento anual e também em relação a um dia estável de verão e a um dia estável de inverno. O dia estável de verão (19 de dezembro) e o estável de inverno (15 de julho) foram escolhidos por terem se mostrado estáveis.

Para que pudesse fazer a comparação entre os modelos, foi utilizada a análise a partir de indicadores de desempenho: MBD (Mean Bias Deviation), o desvio quadrático médio RMSD (Root Mean Square Deviation), expostos no item 2.3.

Em seguida, a Figura 14 demonstra o organograma esquemático da metodologia utilizada nesse trabalho.

¹ O procedimento adotado no desenvolvimento do RTQ-R para este cálculo foi de uso da temperatura operativa, no entanto, essa versão do programa Domus não fornece a temperatura operativa como dado de saída.

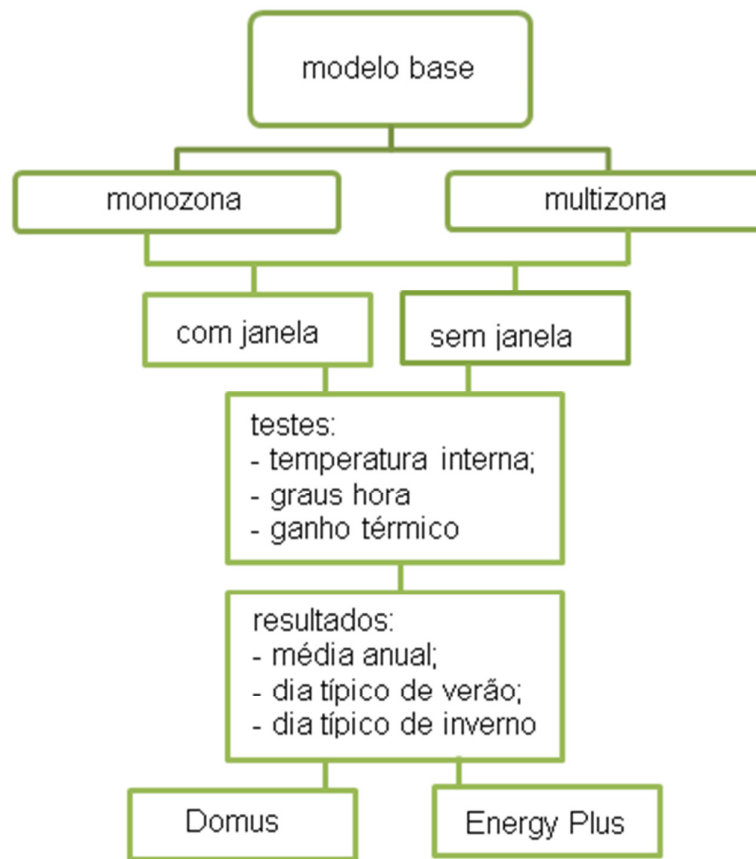


Figura 14: Organograma esquemático da metodologia adotada para o desenvolvimento das simulações do presente trabalho de dissertação.

4. RESULTADOS

4.1 Monozona sem janela

Nos testes iniciais do protótipo monozona sem janela foram feitas as simulações das temperaturas internas médias anuais dos dois programas e estes obtiveram uma diferença de 0,6°C. Esses resultados estão apresentados na Tabela 5 que demonstra também que essa diferença de temperatura corresponde a uma superestimação de 2,75% do Domus em relação ao Energy Plus. Diferença esta, menor que 1°C e, portanto, considerada dentro de uma faixa aceitável.

Tabela 5: Média Anual de Temperatura do protótipo de monozona sem janela

	Temperatura média	MDB	2.75%
Temp. externa	22.0°	RMSD	7.02%
Energy Plus	22.9°		
Domus	23.5°		

O Gráfico 5 e o Gráfico 6 apresentam resultados de temperatura interna e externa para um dia estável de verão (19/12) e um dia estável de inverno (15/07). O comportamento dos programas em relação à temperatura interna nos dois dias, se mantém, ocorrendo subestimação da temperatura do Domus em relação ao Energy Plus nas primeiras horas da manhã e uma superestimação na outra metade do dia. Acredita-se que este comportamento apresentado nas temperaturas internas diárias leve à média de temperatura interna muito próxima entre o Domus e do Energy Plus, como apresentados na Tabela 5.

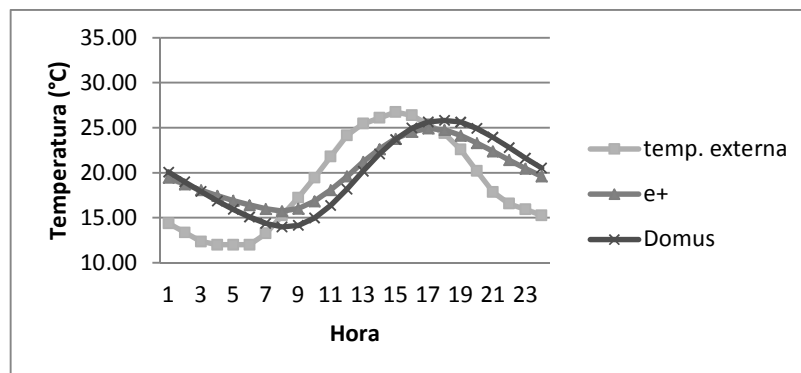


Gráfico 5: Temperatura externa e temperaturas internas do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de monozona sem janela

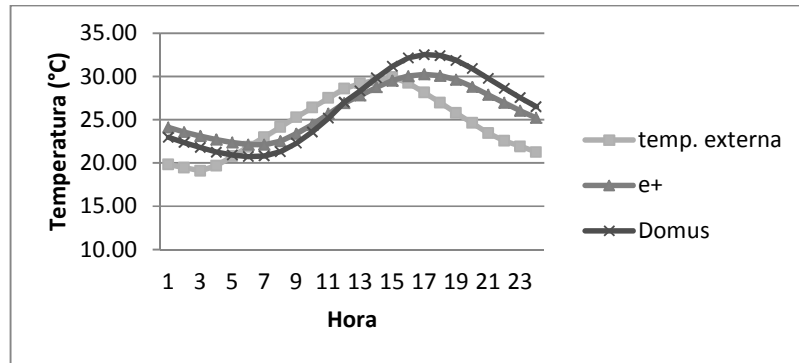


Gráfico 6: Temperatura externa e temperaturas internas do Domus e do Energy plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de monozona sem janela

Tratando-se dos graus hora de resfriamento e de aquecimento nas 8760 horas do ano, apresentados no Gráfico 7, demonstra-se que o Domus tende a superestimar os valores anuais de temperatura, porém nos meses de junho a dezembro também há subestimação das baixas temperaturas. Com isso, apesar da média anual de temperatura interna ter uma diferença pequena entre os dois programas, os graus hora ocorridos no Domus é maior do que ocorridos no Energy Plus. No Domus, os graus hora de resfriamento são de cerca de 13224.50 e no Energy Plus é de 7432.43. Já os graus hora de aquecimento são na ordem de 1845.07 e no Energy Plus de 872.08. Esse resultado leva a uma diferença diária entre o Domus e o Energy Plus de cerca de 0,7°C de resfriamento e de 0,1°C de aquecimento, levando a uma diferença percentual de 2,7% e 0,5% respectivamente, conforme demonstrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

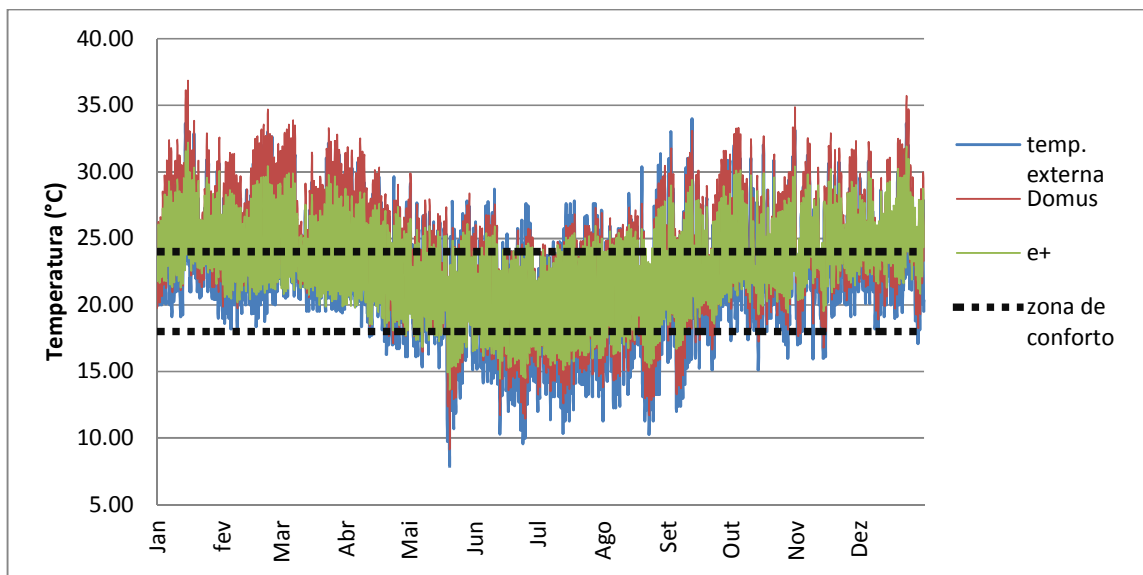


Gráfico 7: Temperatura interna e externa anual do programa Domus e Energy Plus demonstrando os valores acima e abaixo dos limites de temperatura do protótipo de monozona sem janela

Tabela 6: Graus hora de aquecimento e resfriamento no Domus e no Energy Plus no protótipo de monozona sem janelas

graus hora	Diferença média anual de temperatura fora da faixa de conforto ($T_{Domus} - T_{e+}$)	MDB	RMSD
resfriamento ($T > 24^\circ$)	0.7°	2.9%	5,6%
aquecimento ($T < 18^\circ$)	0.1°	0.5%	2,0%

A partir da análise dos gráficos de variação de temperatura e para verificar onde aconteciam as maiores divergências que levavam a diferença dos graus hora, foram comparados os resultados das simulações de carga térmica por superfície. De acordo com o Gráfico 8, observa-se que em algumas fachadas como a norte, a leste e a oeste resultados bem próximos entre os dois programas. Já nas superfícies piso, teto e, em menor escala, na fachada sul, acontecem as maiores diferenças. Isolando as cargas térmicas, como demonstrado no Gráfico 9, verifica-se que nas superfícies do piso e teto, a maioria dos dados do Domus são subestimados em relação aos do Energy Plus. Já na superfície Sul, a grande maioria dos dados do Domus são superestimados em relação ao Energy Plus.

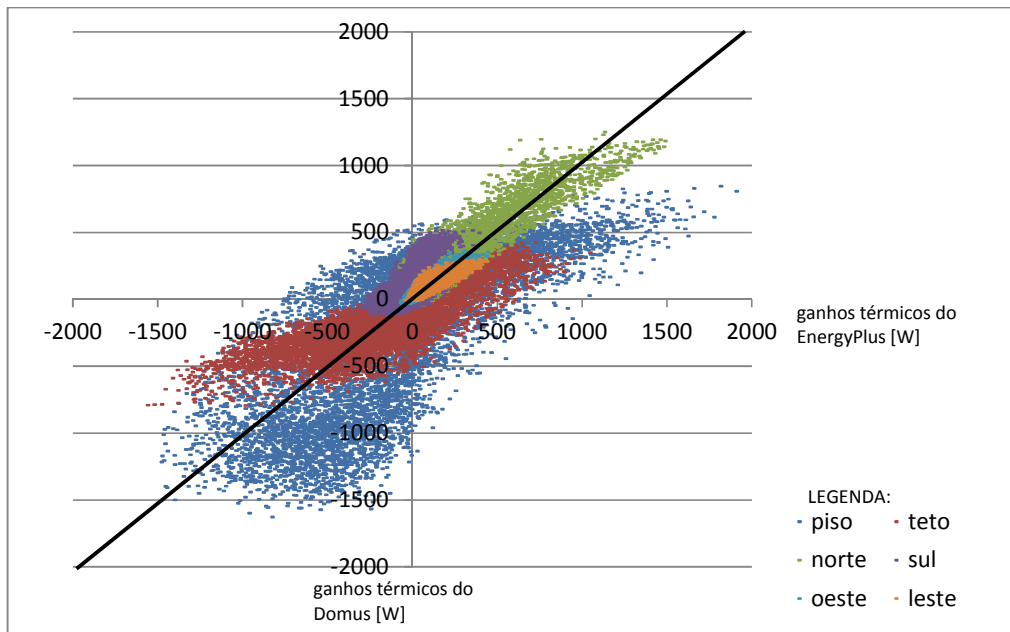


Gráfico 8: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e Energy Plus do protótipo de monozona sem janela para todas as superfícies opacas

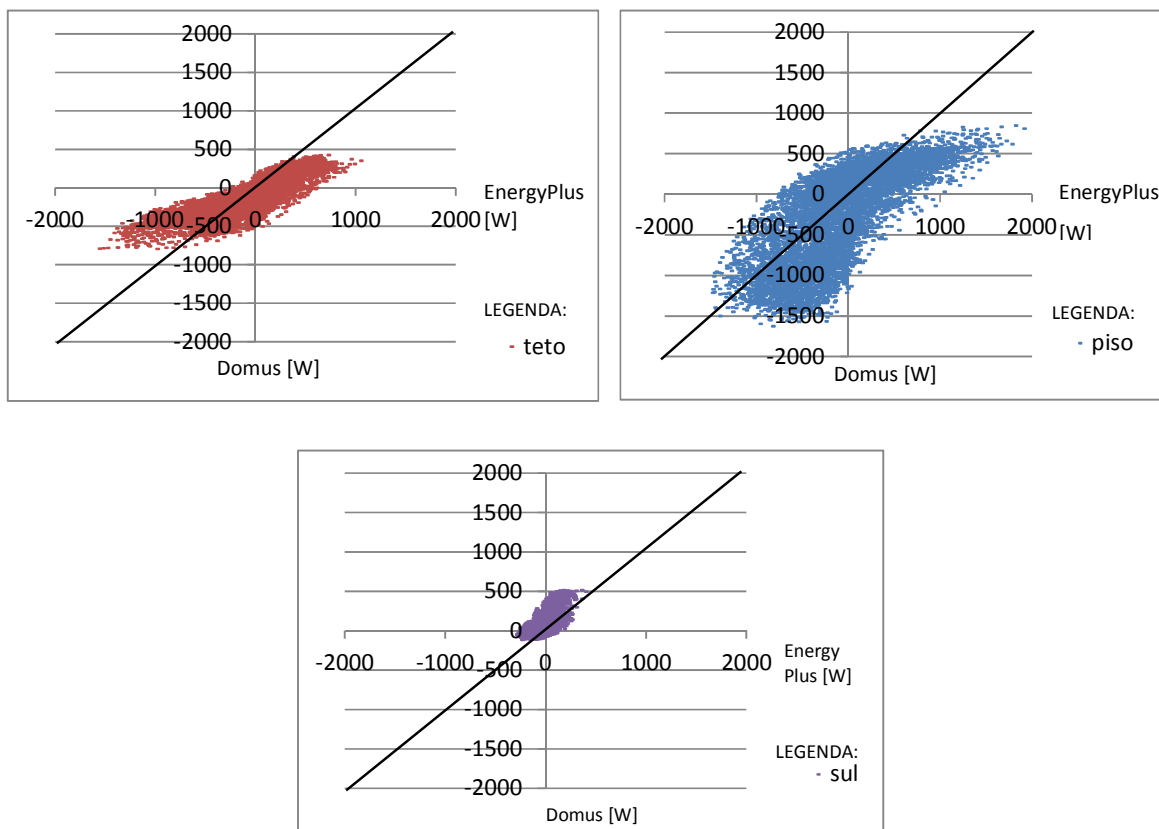
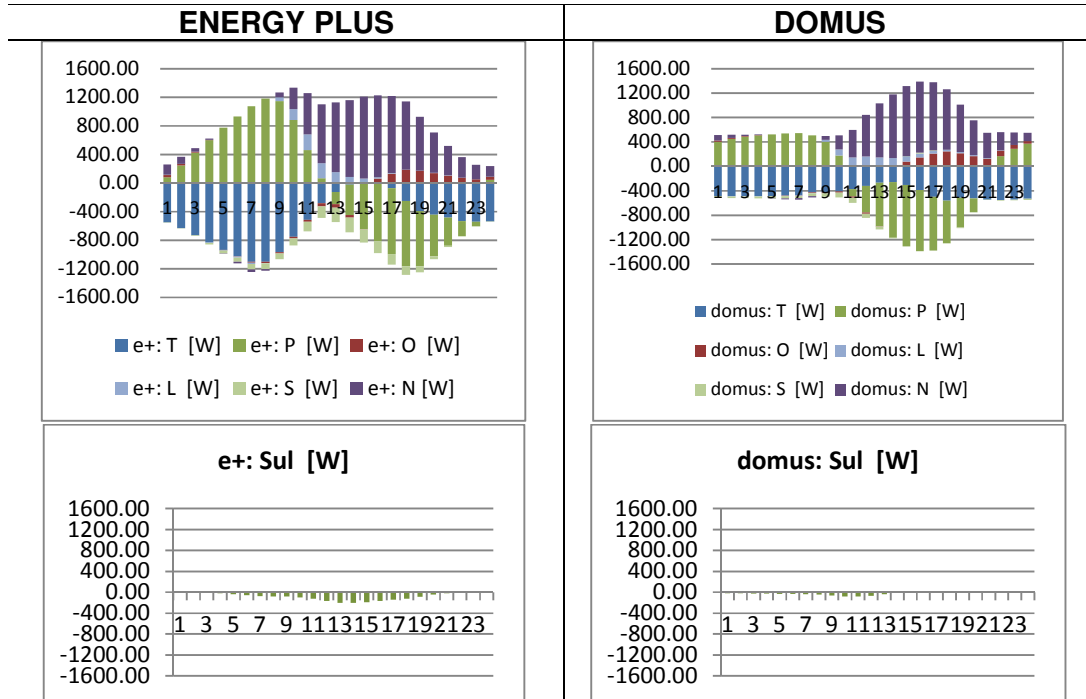


Gráfico 9: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e Energy Plus do protótipo de monozona sem janela das superfícies teto, piso e sul

A partir desses dados fez-se uma análise dessas superfícies em um dia estável de inverno (15/07) e um dia estável de verão (19/12) para se verificar como essas cargas térmicas se comportam, como demonstrado na

Figura 15 e na

Figura 16. Comprovou-se que há a superestimação tanto no verão quanto no inverno dos dados da superfície sul. Na superfície do piso no inverno há uma subestimação dos valores do Domus em relação ao Energy Plus, diferentemente do verão que há uma superestimação dos valores, havendo uma perda bem maior de calor por essa superfície. Já com relação ao teto, o programa Domus demonstra uma perda de calor menos acentuada durante as primeiras horas do dia tanto no verão como no inverno em relação Energy Plus e no verão ele mostra uma menor perda de calor que o Energy Plus na parte da tarde. Os ganhos térmicos das outras superfícies estão demonstrados no Anexo A.



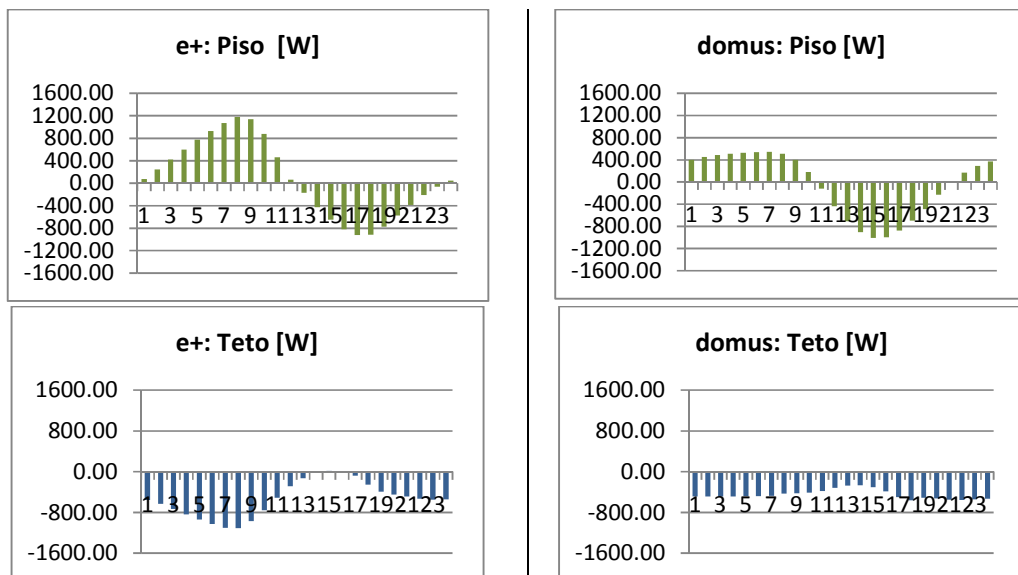
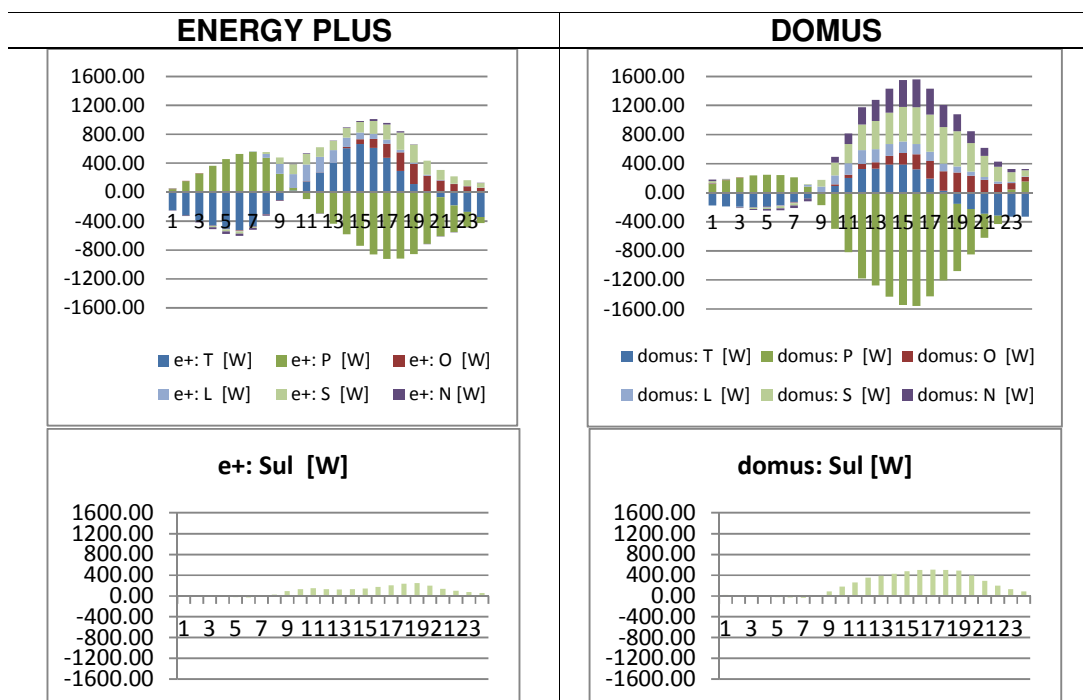


Figura 15: Ganhos térmicos dos programas Energy Plus e Domus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de monozona sem janela: global e nas superfícies sul, piso e teto



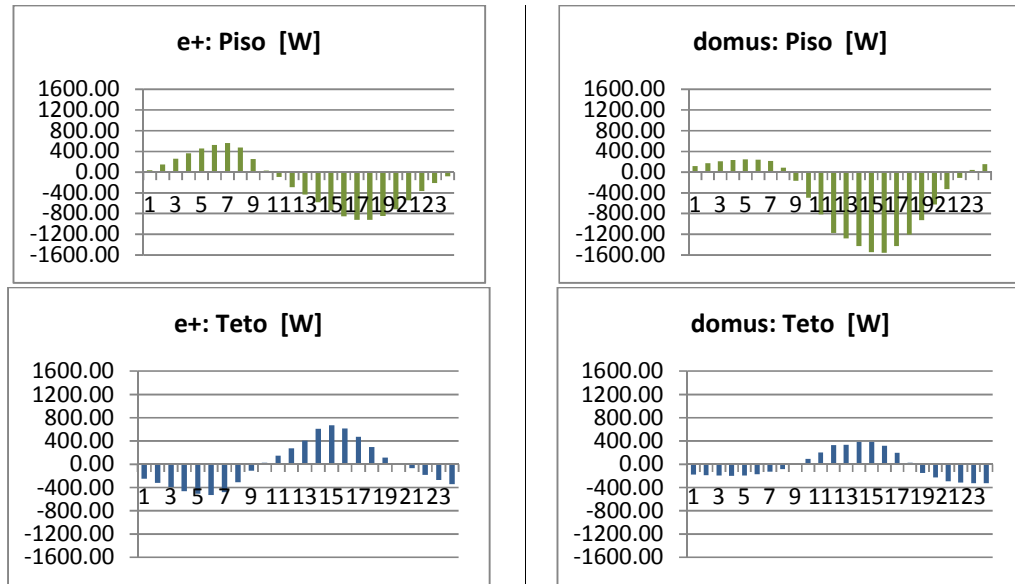


Figura 16: Ganhos térmicos dos programas Energy Plus e Domus dia estável de verão (19/12) no protótipo de monozona sem janela: global e nas superfícies sul, piso e teto

4.2 Monozona com janela

No protótipo de monozona com janelas, as simulações das temperaturas internas anuais dos dois programas obtiveram uma diferença de $0,83^{\circ}\text{C}$ entre si. Os resultados estão apresentados na Tabela 7, que demonstra também que essa diferença de temperatura corresponde a uma superestimação do Domus em relação ao Energy Plus de 5,73%. Diferença esta considerada dentro da faixa aceitável, inferior a 1°C .

Tabela 7: Média Anual de Temperatura interna fornecida pelo Domus e pelo Energy Plus para o protótipo de monozona com janelas

	temperatura	MDB	5.73%
Temp. externa	22.0°	RMSD	9.68%
Energy Plus	23.3°		
Domus	24.2°		

Verificando um dia estável de inverno (15/07) e um dia estável de verão (19/12) para constatar o comportamento da temperatura interna calculada para o ambiente, pode-se observar que há uma subestimação dos valores nas primeiras horas da manhã e superestimação durante à tarde do Domus em relação ao Energy Plus, fazendo com que na média esses valores fiquem próximos. A diferença ocorrida durante o dia estável de verão é de cerca 2,38% e no inverno é de 1,59% a mais do Domus em relação ao Energy Plus. Esses dados podem ser verificados nos Gráfico 10 e no Gráfico 11.

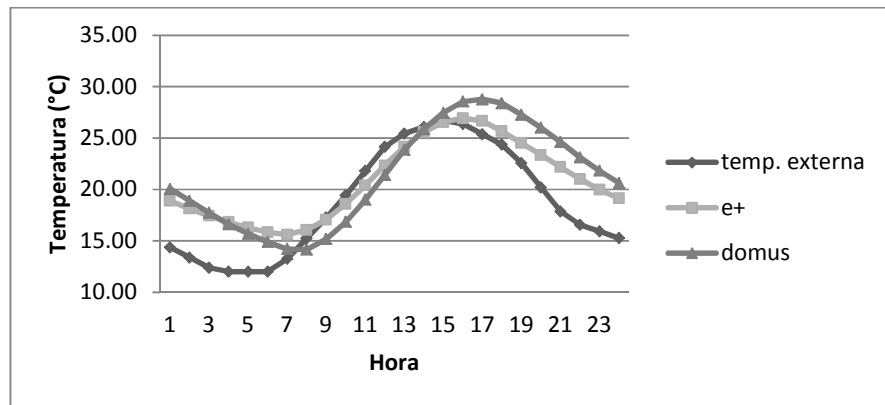


Gráfico 10: Temperaturas externa e interna fornecidas pelos programas Domus e Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de monozona com janela

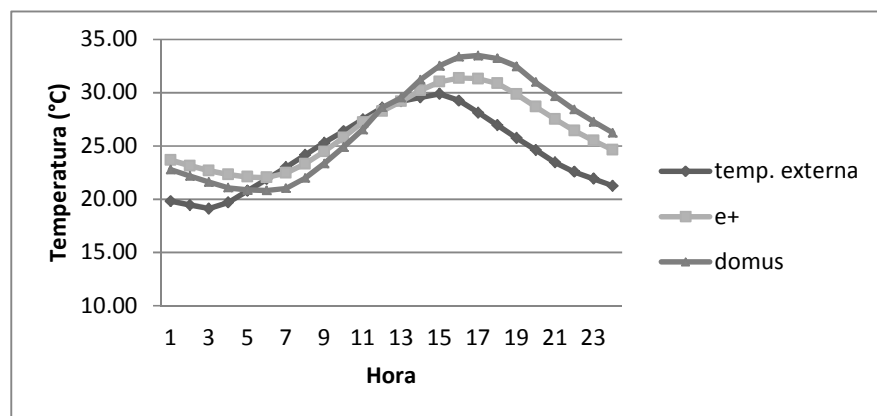


Gráfico 11: Temperaturas externa e internas fornecidas pelos programas Domus e Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de monozona com janela

Apesar das médias de temperatura interna terem apresentado pequena divergência, quando se avalia os graus hora de resfriamento (temperatura acima de 24°C) e aquecimento (temperatura abaixo de 18°C), a diferença entre os resultados são consideráveis. No Domus há uma superestimação das altas temperaturas anuais (temperaturas acima de 24°C) e nos meses de junho a outubro uma superestimação das baixas temperaturas (temperaturas abaixo de 18°C). Os graus hora anuais de resfriamento do Domus foi de 16756,1 e no Energy Plus de 10267,9, apresentando uma diferença anual de 63,2%. Já os graus hora de aquecimento anual no Domus são de 1528,3 e no Energy Plus de 890,2. Esse resultado leva a uma diferença diária entre os programas de cerca de 0,7°C para o resfriamento e de 0,1°C de aquecimento entre o Domus e o Energy Plus, levando a uma diferença percentual de 3,2% e 0,3% respectivamente. A Tabela 8 demonstra os graus hora anuais e a percentagem de diferença entre os programas e no Gráfico 12 os valores horários são apresentados e a diferença de temperatura confirmada durante todo o ano.

Tabela 8: Graus hora de aquecimento e resfriamento no Domus e no Energy Plus no protótipo de monozona com janelas

graus hora	Diferença média anual de temperatura fora da faixa de conforto ($T_{Domus}-T_{e+}$)	MDB	RMSD
resfriamento (>24°)	0,7°	3,2%	10,7%
aquecimento (<18°)	0.1°	0.3%	2,6%

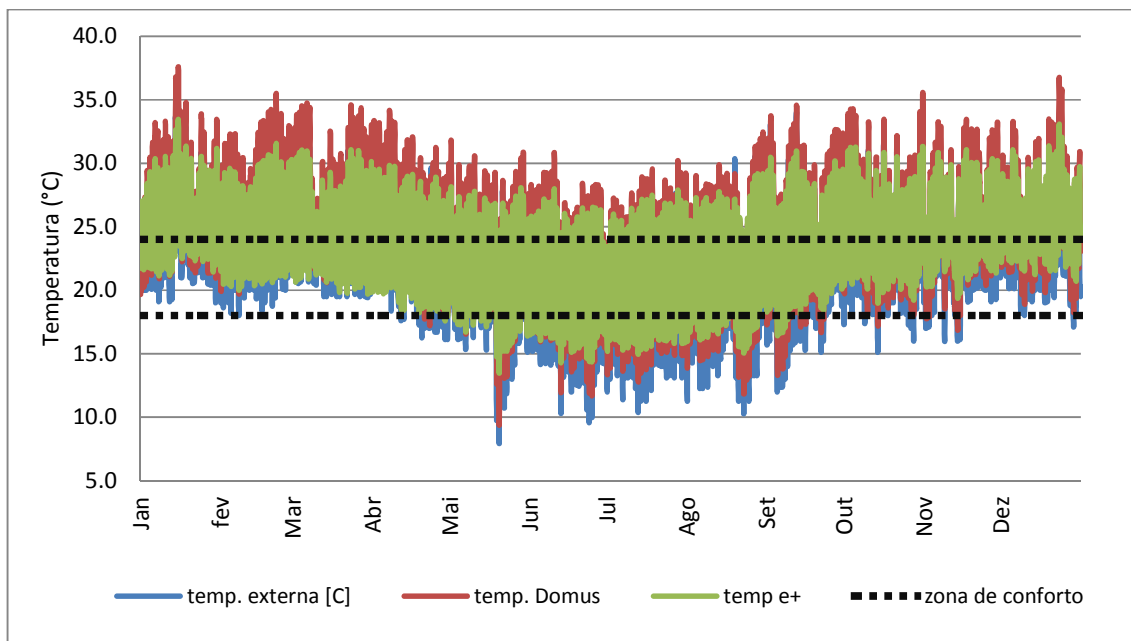


Gráfico 12: Temperatura externa e interna do Domus e do Energy Plus horária ao longo do ano do protótipo de monozona com janelas com delimitação das temperaturas limites mínima e máxima para cálculo de graus hora

Essa diferença nos graus hora ocorre devido à diferença de ganhos de calor por algumas superfícies do ambiente. Pelo Gráfico 13 observa-se que os maiores ganhos acontecem pelas janelas do ambiente do protótipo de monozona com janelas. Para se verificar o comportamento das demais cargas térmicas no ambiente, retirou-se a carga térmica das janelas e com isso pode-se perceber pelo Gráfico 14 que há uma tendência à superestimação dos dados do piso do Domus em relação a do Energy Plus. Já a superfície sul, apesar de ter uma carga pequena em relação às outras superfícies, há uma subestimação dos dados do Domus em relação aos do Energy Plus. Na superfície do teto também a divergência de dados é significativa, que leva a dispersão dos resultados. Com isso, confirma-se a diferença dos graus hora devido às diferenças nos ganhos térmicos das superfícies.

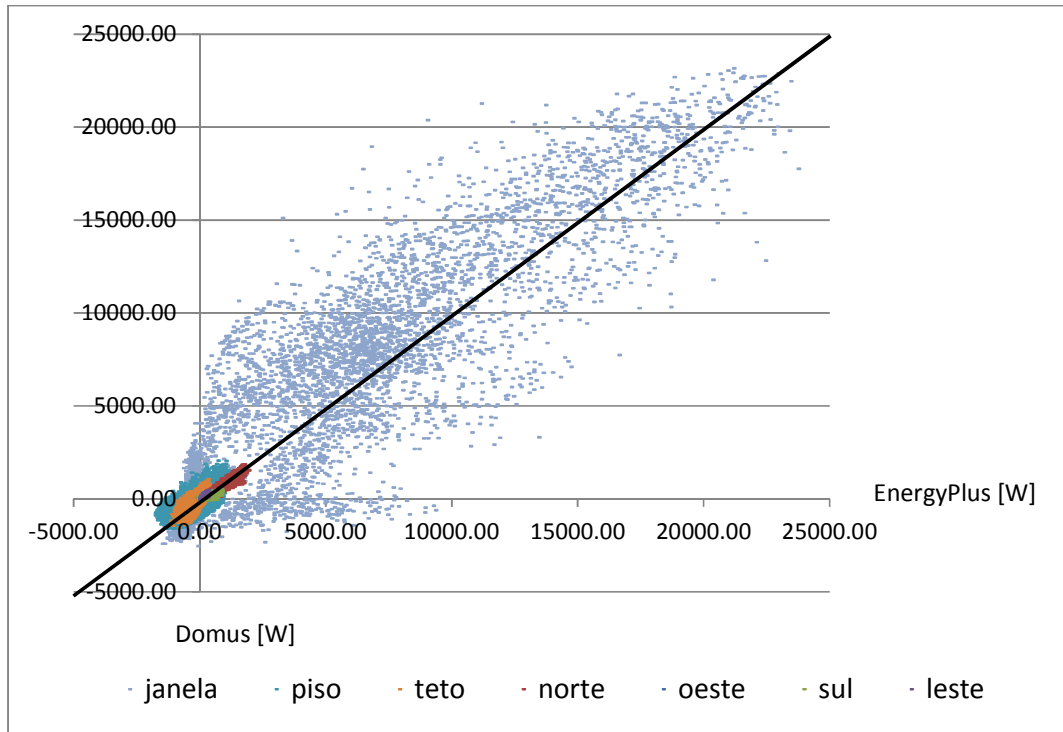


Gráfico 13: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus de todas as superfícies do protótipo monozona com janelas

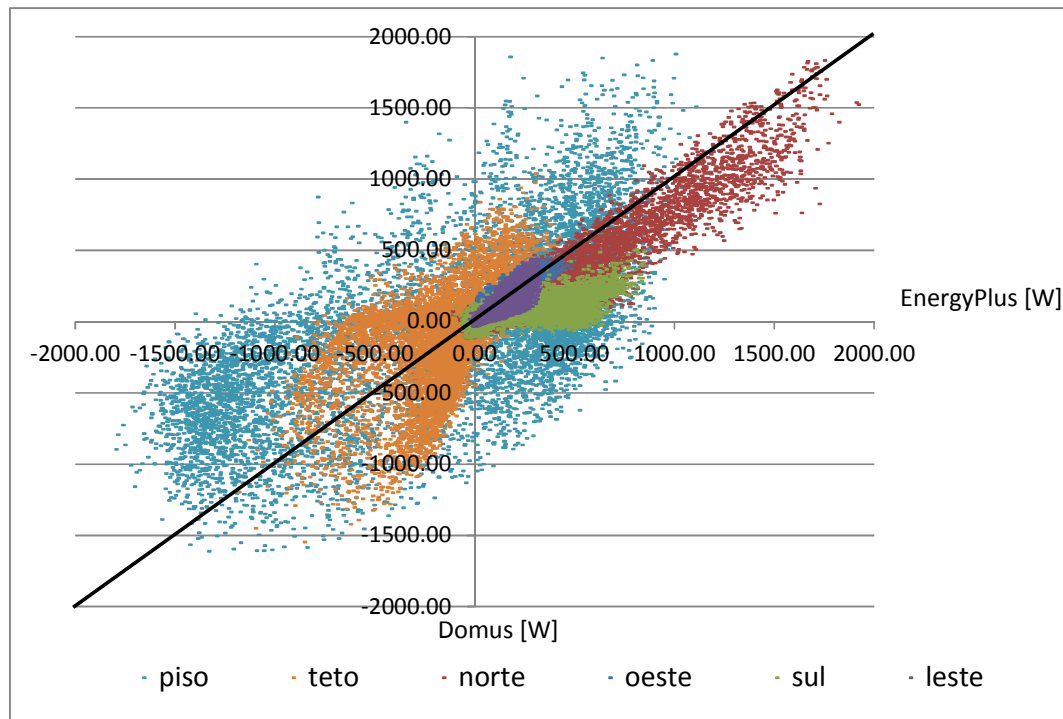
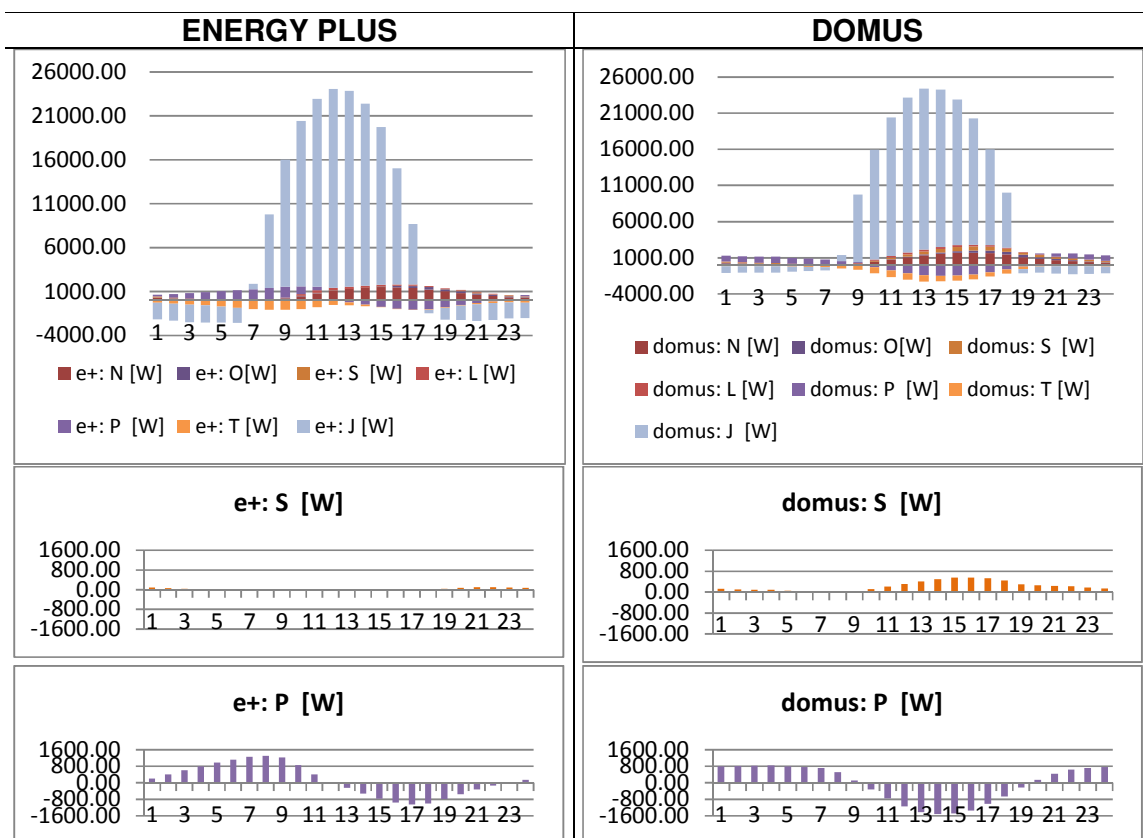


Gráfico 14: Regressão dos ganhos térmicos internos do Domus e do Energy das superfícies opacas do protótipo de monozona com janelas

Analisando o comportamento de um dia estável de inverno (15/07) e um dia estável de verão (19/12), conforme demonstrado nas Figura 17e Figura 18, confirmou-se que as maiores diferenças ocorriam nas superfícies sul, teto e piso. A superestimação dos dados da superfície sul do Domus em relação ao Energy Plus é ordem de 275%. No piso, há uma subestimação dos dados do Domus em relação ao do Energy Plus na primeira metade do dia e uma superestimação na segunda metade, fazendo com que haja uma compensação diária dos valores. Já no teto, no dia estável de inverno, na parte da manhã há uma subestimação dos ganhos e à tarde, uma superestimação e no verão, acontece à subestimação dos ganhos durante todo o dia do Domus em relação ao Energy Plus. Os ganhos térmicos das demais superfícies estão demonstrados no Anexo A.



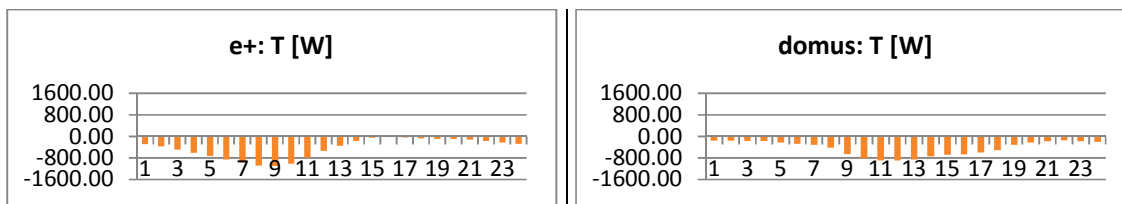


Figura 17: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de monozona com janelas: global e nas superfícies sul, piso e teto

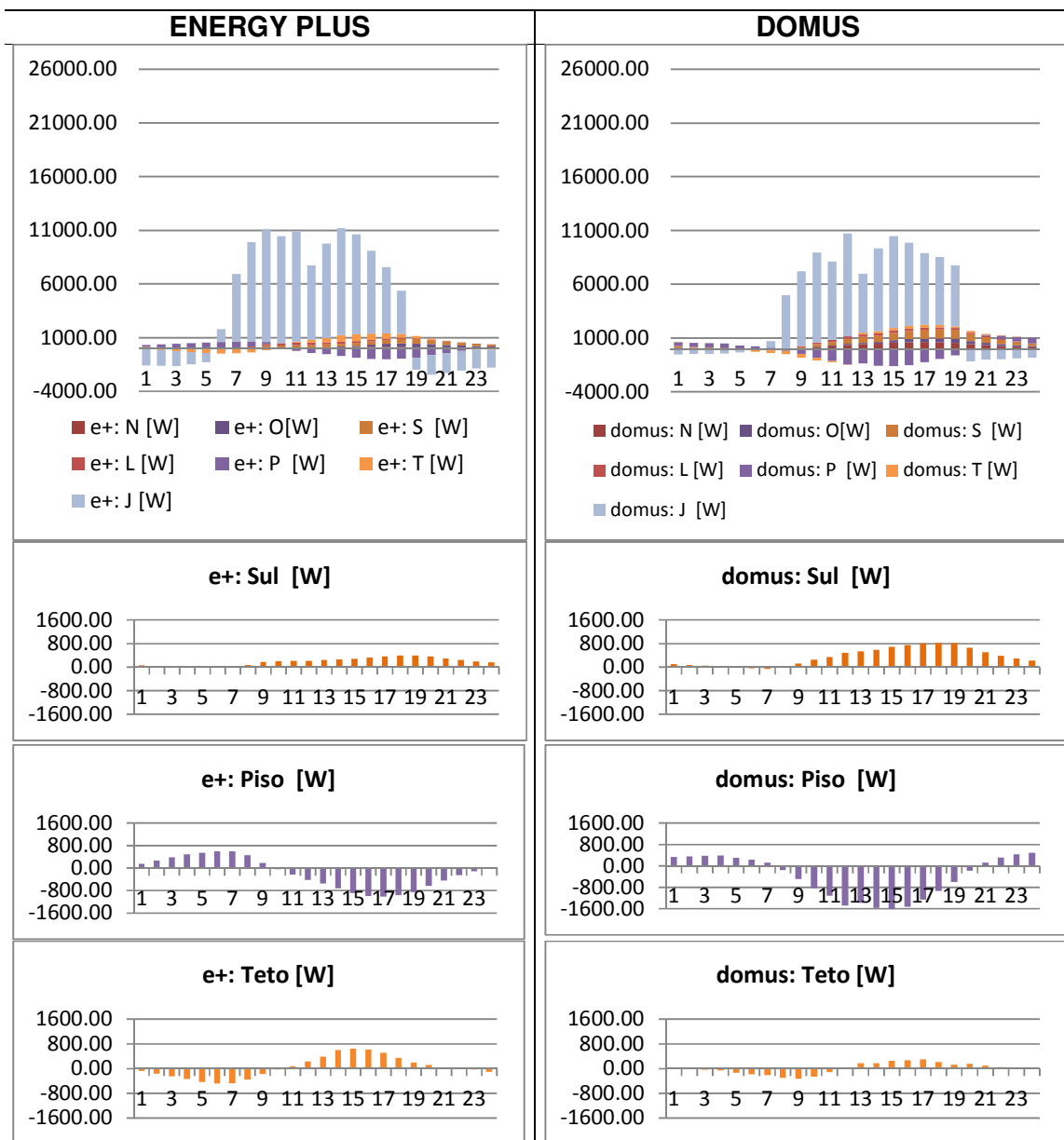


Figura 18: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de monozona com janelas: global e nas superfícies sul, piso e teto

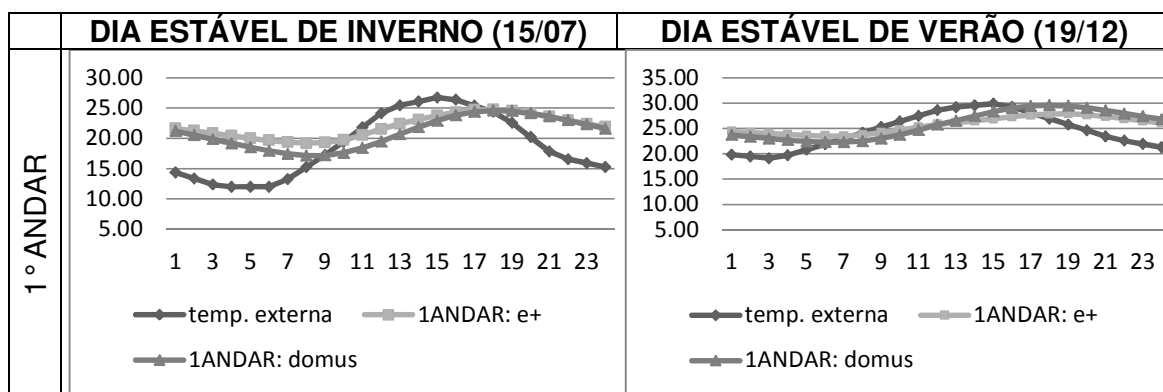
4.3 Multizona sem janelas

No protótipo com multizonas sem janelas, a simulação da temperatura interna foi feita para as cinco zonas do projeto. Os resultados obtidos apresentaram diferenças de 0,08°C a 0,61°C, que corresponde de 0,35% a 2,53% de superestimação do Domus em relação ao Energy Plus, como pode ser verificado na Tabela 9. Diferença esta considerada dentro da faixa aceitável, ou seja, inferior a 1° C.

Tabela 9: Temperatura externa e interna nos programas Domus e Energy Plus no protótipo com multizonas sem janelas

	Temp. externa (°C)	Energy Plus (°C)	Domus (°C)	MDB	RMSD
1° andar	22.0	23.7	24.1	1.80%	2.76%
2° andar	22.0	24.5	24.6	0.35%	1.20%
3° andar	22.0	24.7	24.9	0.66%	1.63%
4° andar	22.0	24.6	25.0	1.75%	2.67%
5° andar	22.0	23.9	24.5	2.53%	0.67%

Analisando um dia estável de inverno (15/07) e um dia estável de verão (19/12), conforme os resultados do Gráfico 15, verifica-se que no dia estável de verão, as temperaturas dos dois programas são bem próximas, diferentemente do dia estável de inverno que há uma subestimação dos dados do Domus em relação ao Energy Plus. As maiores diferenças ocorrem nos andares intermediários com a variação de 7,01% no 2° andar, de 6,91% no 3° andar e 5,03% no 4° andar.



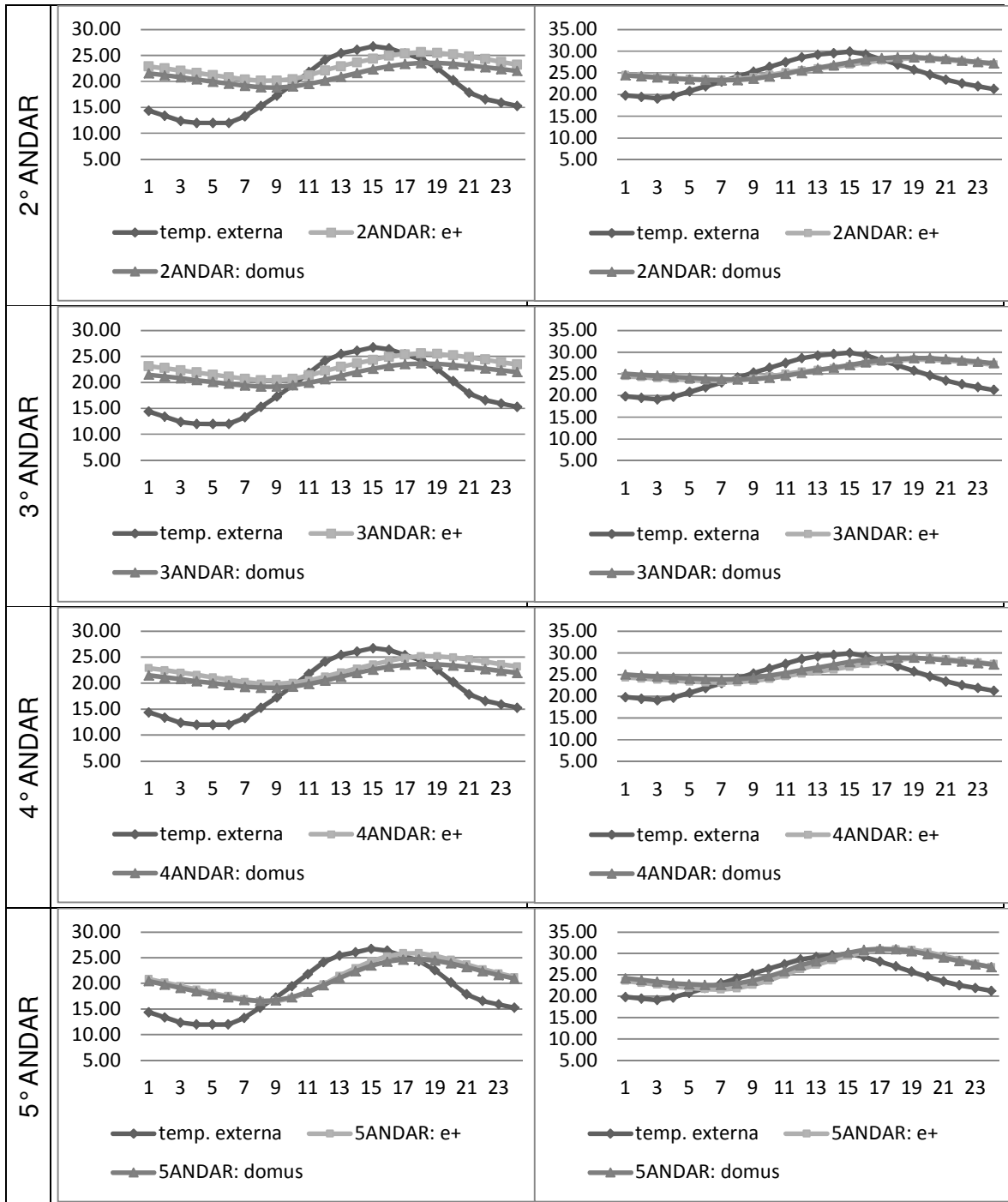


Gráfico 15: Temperaturas externas e internas do Domus e do Energy Plus em um dia estável de inverno (15/07) e dia estável de verão (19/12) no protótipo com multizonas sem janelas

Os graus hora anuais dos dois programas obtiveram diferenças menores que no protótipo de monozona com e sem janelas, exceto no primeiro andar que apresentou diferenças significativas, como pode ser verificado no Gráfico 16, em que há uma superestimação do Domus em relação ao Energy Plus. A tendência desse teste foi

de subestimação dos resultados do Domus em relação aos do Energy Plus, que variou de 0,1°C a 0,7°C entre eles, o que é uma diferença percentual de 0,32% a 2,93%.. Nos graus hora de aquecimento, graus hora das temperaturas abaixo de 18°C, a diferença de valores entre os programas tendem a zero, com diferenças percentuais que variam de 0,02% a 0,15%. O comportamento da temperatura interna nos dois programas está demonstrado do Gráfico 16 ao Gráfico 20.

Tabela 10: Graus hora de aquecimento e de resfriamento do Domus e Energy Plus no protótipo com multizonas sem janelas

Graus hora	andar	Diferença média anual de temperatura fora da faixa de conforto ($T_{Domus}-T_{e+}$)	MDB	RMSD
aquecimento	1° andar	0.04°	0.15%	0.79%
	2° andar	0.01°	0.02%	0.32%
	3° andar	0.04°	0.15%	0.79%
	4° andar	0.01°	0.02%	0.32%
	5° andar	0.04°	0.15%	0.79%
resfriamento	1° andar	0.7°	2.93%	8.47%
	2° andar	0.3°	1.39%	6.44%
	3° andar	0.2°	0.79%	0.38%
	4° andar	0.1°	0.32%	0.24%
	5° andar	0.2°	0.79%	0.38%

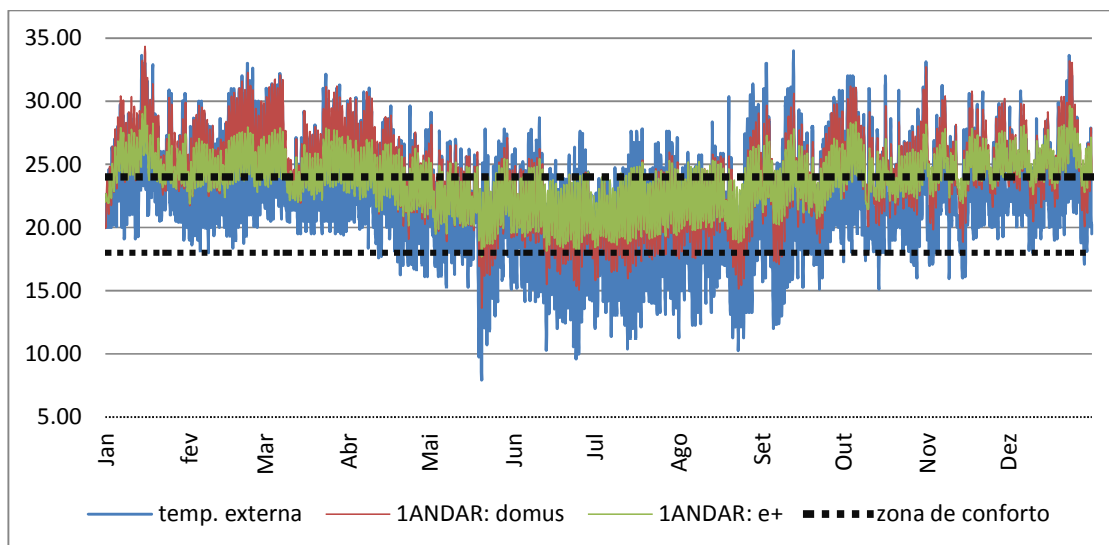


Gráfico 16: Temperatura horária anual: externa e internas do Domus e do Energy Plus com delimitação da faixa para cálculo de graus-hora do 1º andar no protótipo com multizonas sem janelas

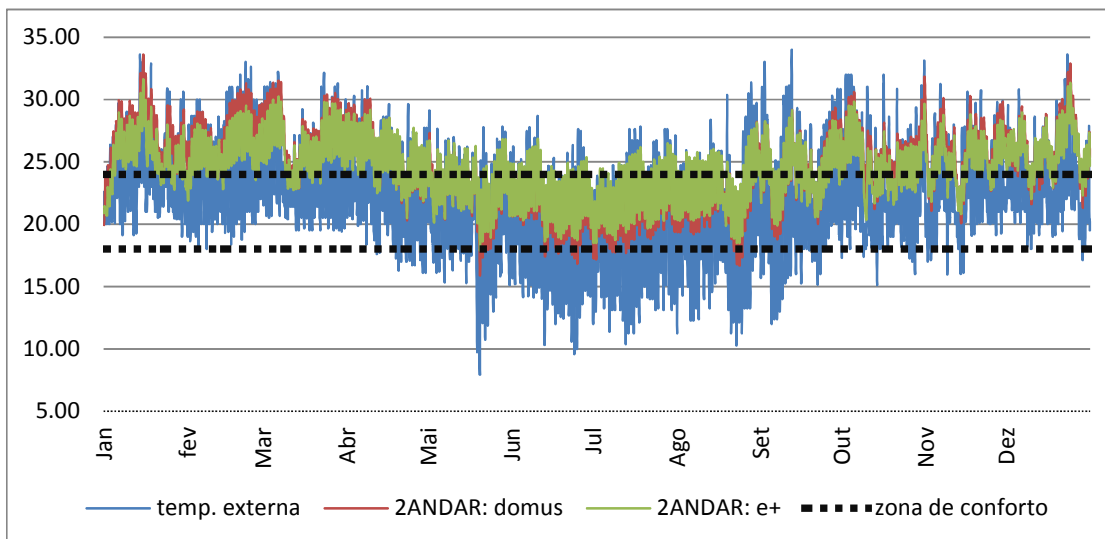


Gráfico 17: Temperatura horária anual: externa e internas do Domus e do Energy Plus com delimitação da faixa para cálculo de graus-hora do 2º andar no protótipo com multizonas sem janelas

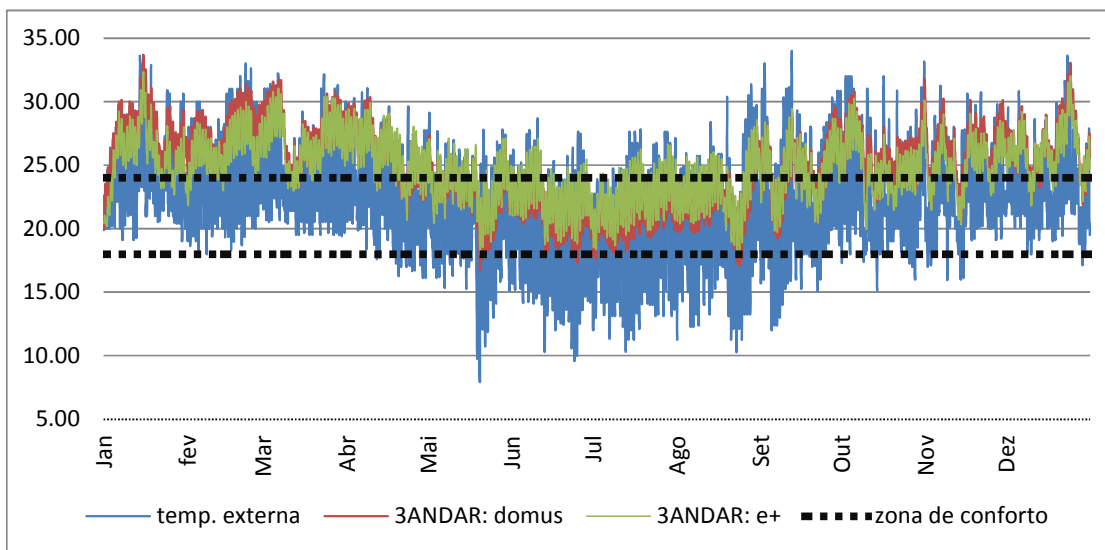


Gráfico 18: Temperatura horária anual: externa e internas do Domus e do Energy Plus com delimitação da faixa para cálculo de graus-hora do 3º andar no protótipo com multizonas sem janelas

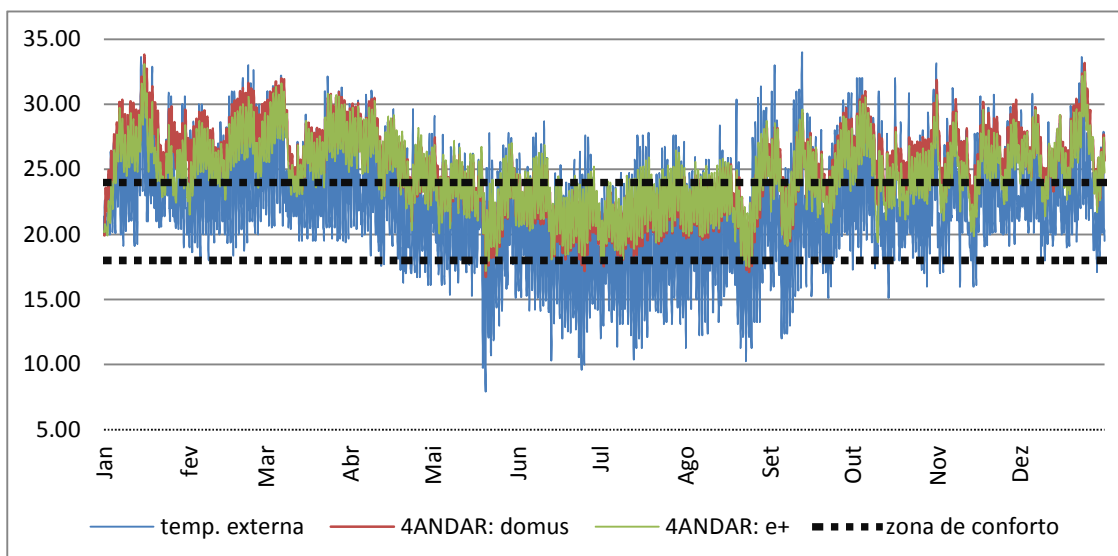


Gráfico 19: Temperatura horária anual: externa e internas do Domus e do Energy Plus com delimitação da faixa para cálculo de graus-hora do 4º andar no protótipo com multizonas sem janelas

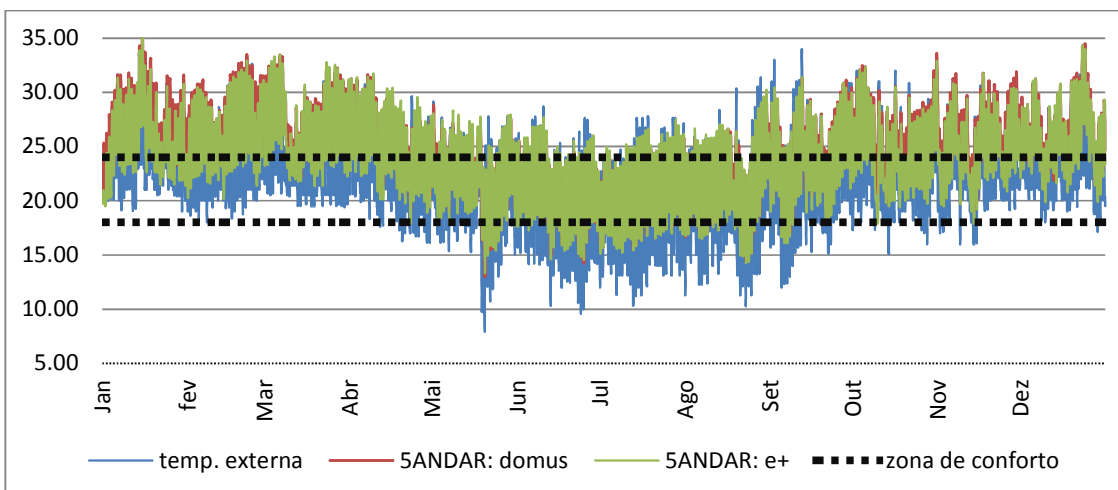


Gráfico 20: Temperatura horária anual: externa e internas do Domus e do Energy Plus com delimitação da faixa para cálculo de graus-hora do 5º andar no protótipo com multizonas sem janelas

Apesar da diferença entre os graus hora ter sido pequena, foram feitos testes para verificar o comportamento dos ganhos térmicos nas superfícies dos cinco pavimentos do protótipo de multizonas sem janelas. Verificou-se que no primeiro pavimento, como pode ser demonstrado no Gráfico 21, as maiores divergências acontecem na superfície do teto, em que acontece uma superestimação; nos dados da superfície do piso, em que acontece uma subestimação e nos dados da fachada

sul em que acontece (em uma menor proporção), uma subestimação dos dados do Domus em relação ao Energy Plus.

Nos andares intermediários (2º, 3º e 4º andar), as divergências dos ganhos térmicos são semelhantes, ocorrendo à superestimação dos dados de teto e piso e subestimação dos dados da superfície sul do Domus em relação ao Energy Plus.

Já no andar superior, quinto pavimento, a diferença mais significativa acontece no piso, que pode ser por causa dessa superfície estar em contato com outra superfície do andar inferior do protótipo de multizonas. Outra diferença acontece no teto, havendo a superestimação dos dados fornecidos pelo Domus em relação ao Energy Plus.

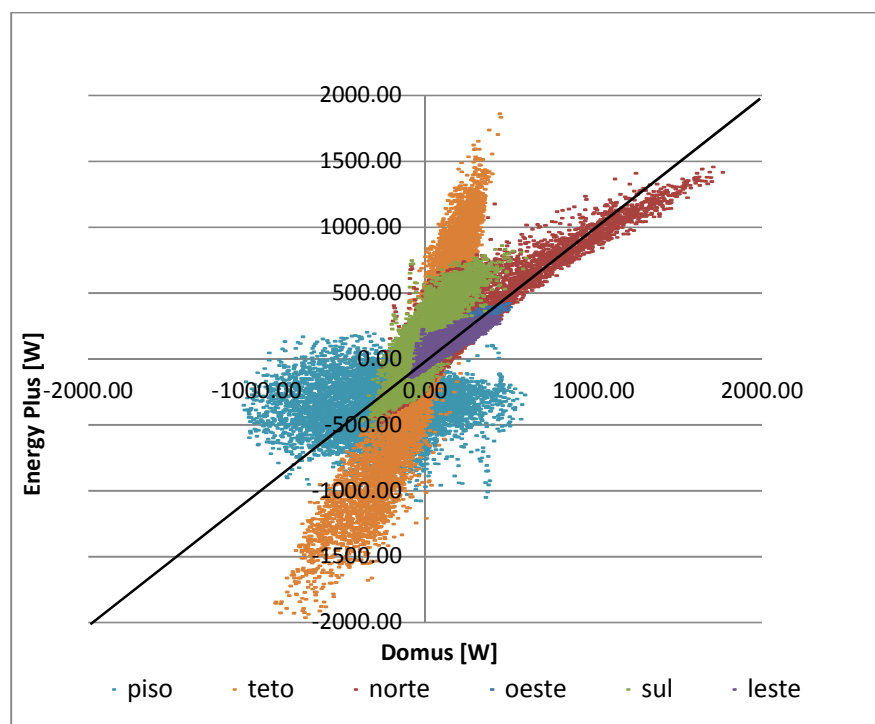


Gráfico 21: Regressão dos ganhos térmicos horários ao longo do ano no primeiro pavimento do protótipo de multizonas sem janela para as superfícies opacas teto, piso e fachadas norte, sul, leste e oeste.

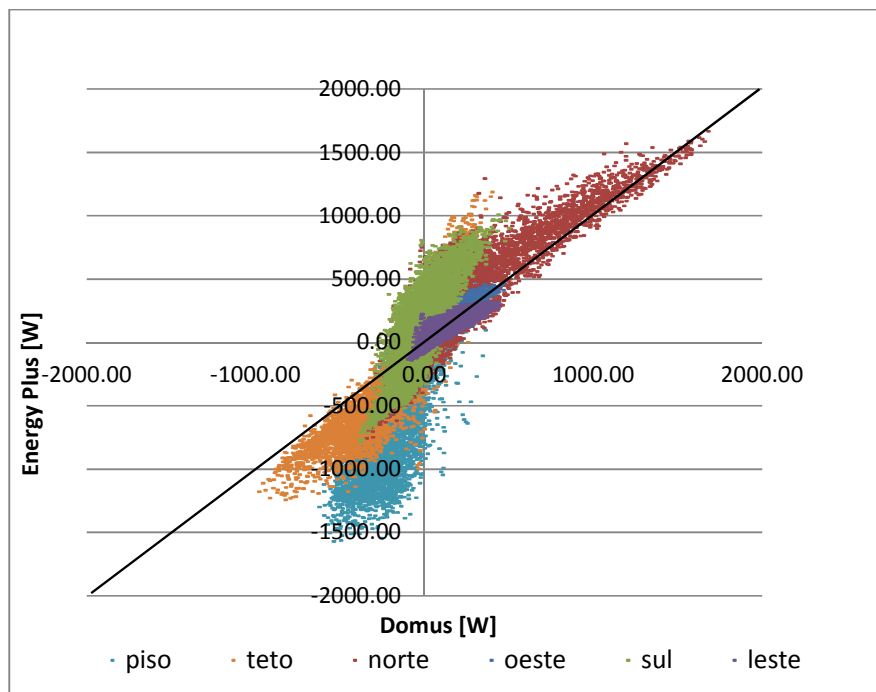


Gráfico 22: Regressão dos ganhos térmicos horários ao longo do ano no segundo pavimento do protótipo de multizonas sem janela para as superfícies opacas teto piso e fachadas norte, sul, leste e oeste.

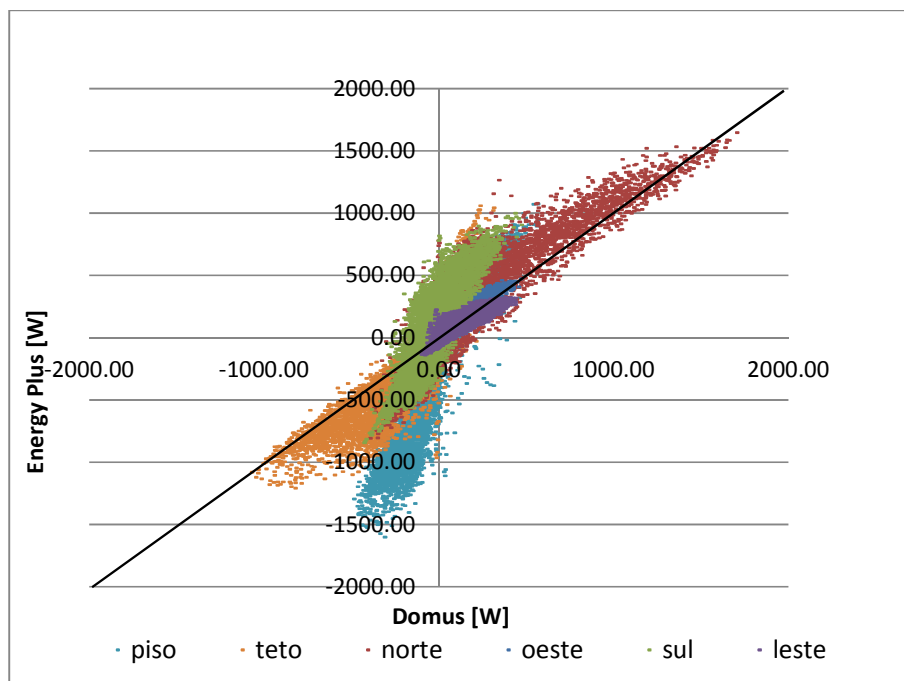


Gráfico 23: Regressão dos ganhos térmicos horários ao longo do ano no terceiro pavimento do protótipo de multizonas sem janela para as superfícies opacas teto piso e fachadas norte, sul, leste e oeste.

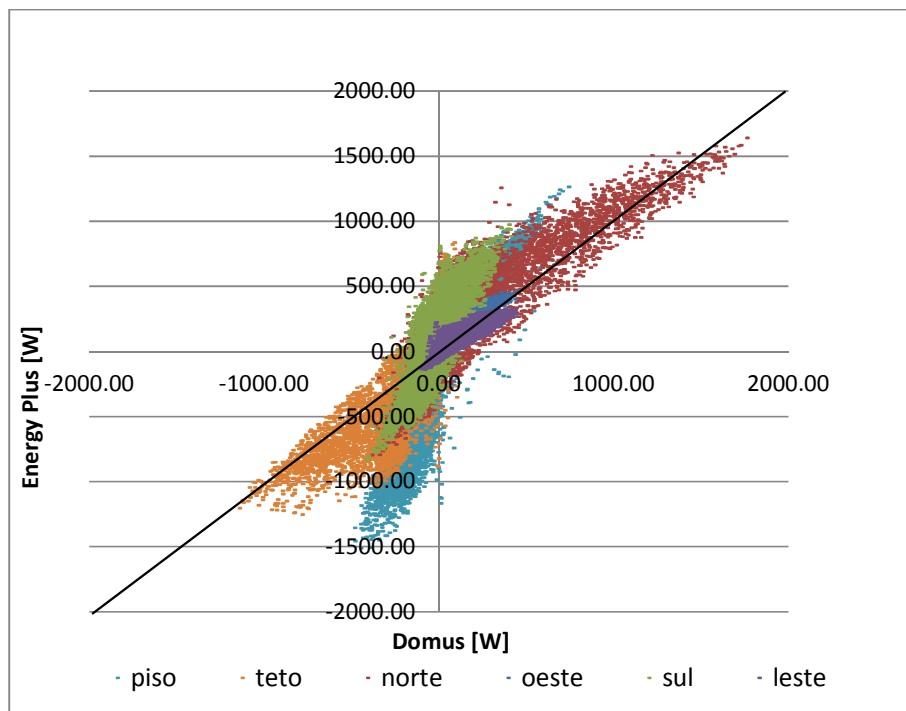


Gráfico 24: Regressão dos ganhos térmicos horários ao longo do ano no quarto pavimento do protótipo de multizonas sem janela para as superfícies opacas teto piso e fachadas norte, sul, leste e oeste.

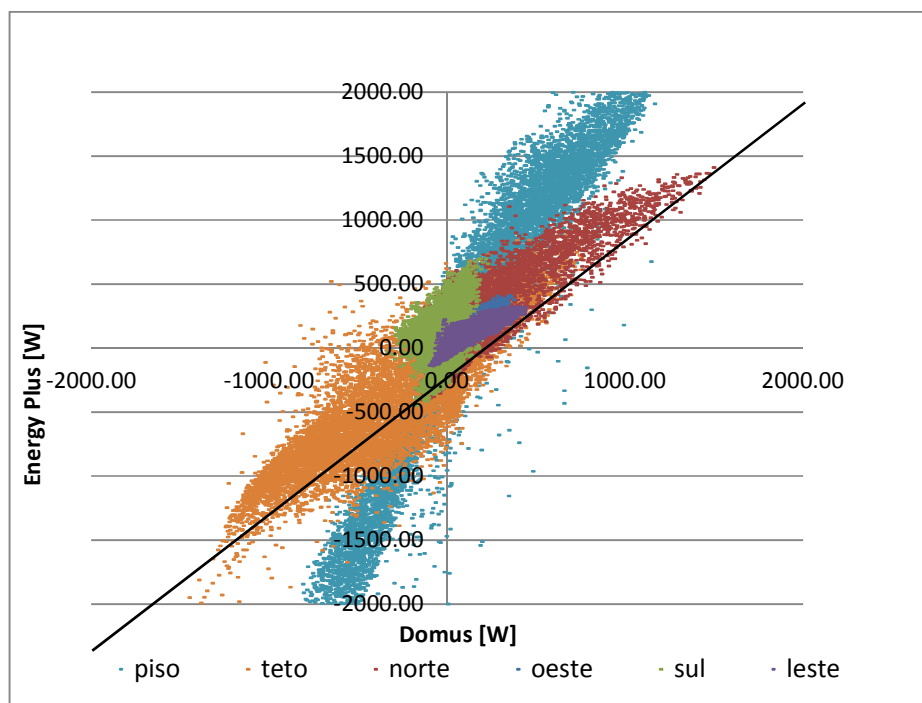
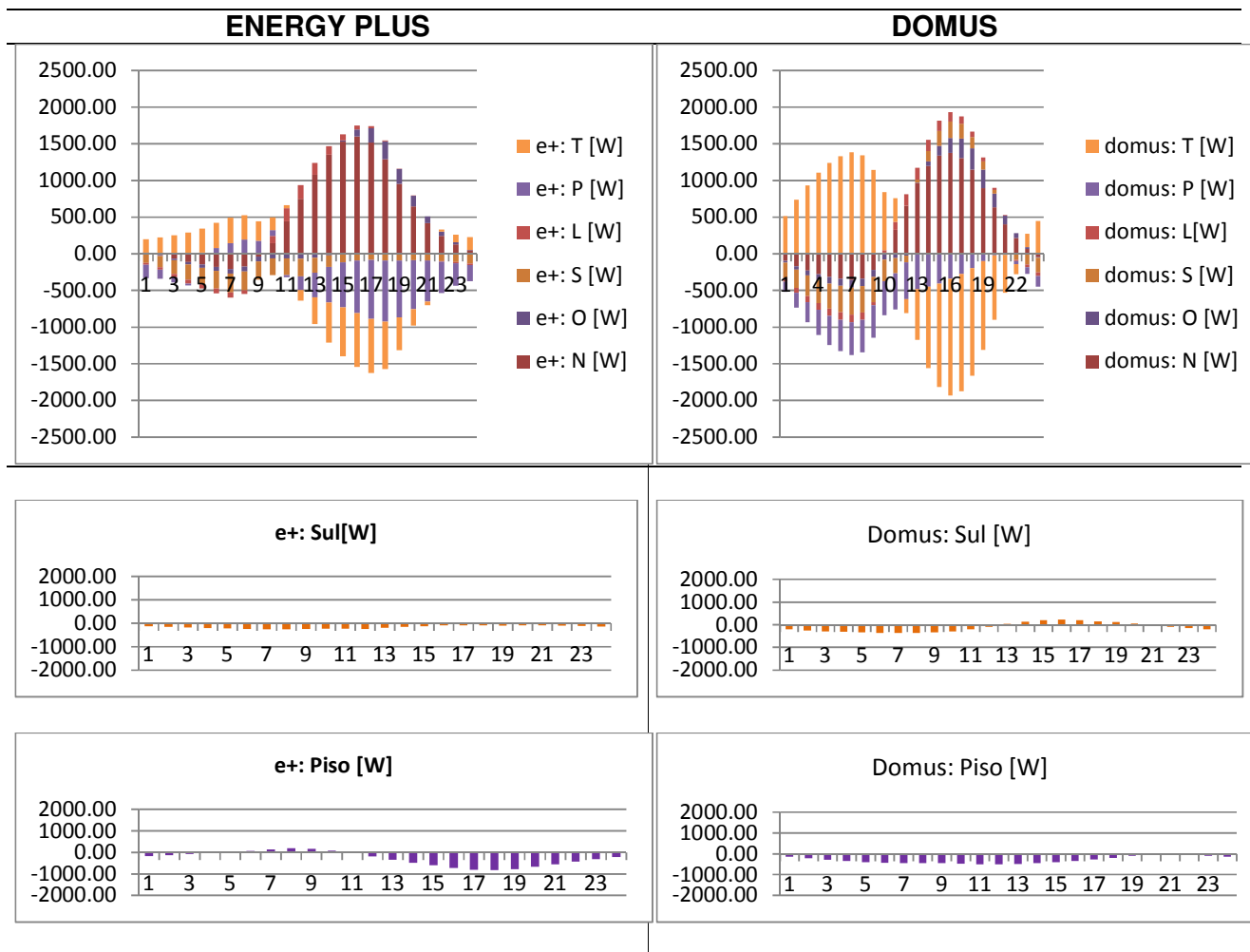


Gráfico 25: Regressão dos ganhos térmicos horários ao longo do ano no quinto pavimento do protótipo de multizonas sem janela para as superfícies opacas teto piso e fachadas norte, sul, leste e oeste.

Analisando o comportamento de um dia estável de inverno (15/07) e um dia estável de verão (19/12), escolheram-se o andar inferior, o andar intermediário e o superior para fazer uma análise do comportamento das cargas térmicas nos ambientes. Conforme demonstrado da Figura 16 à Figura 24, confirmou-se que as maiores diferenças entre as saídas do Domus e do Energy Plus ocorriam nas superfícies sul, teto e piso em todos os três pavimentos analisados. A superestimação dos dados da superfície de teto e piso quando este está em contato com outro ambiente é significativo tanto no verão quanto no inverno (teto do primeiro pavimento, teto e piso do terceiro pavimento e piso do quinto pavimento). Os ganhos térmicos das outras superfícies estão demonstrados no Anexo A.



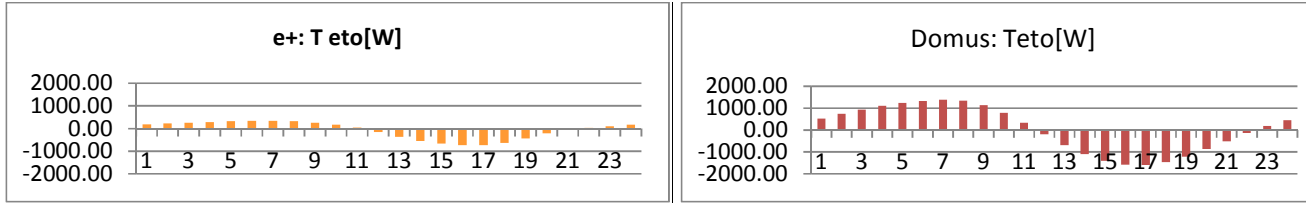


Figura 19: Ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizona sem janelas nas superfícies sul, piso e teto no 1º andar

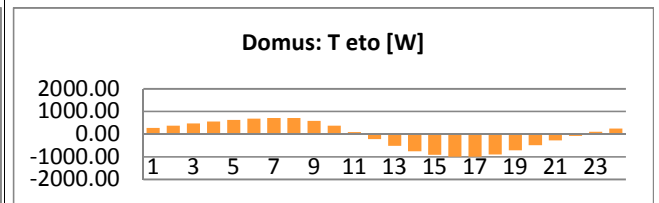
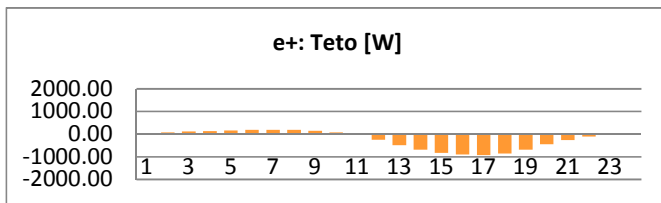
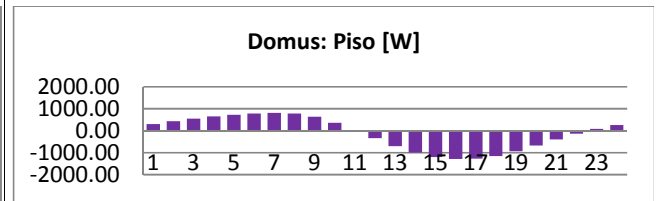
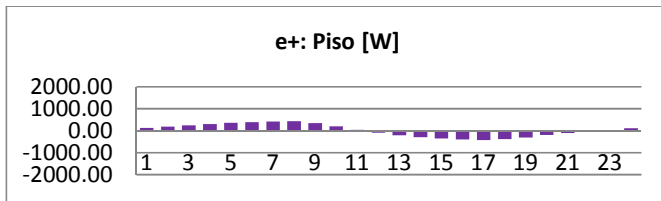
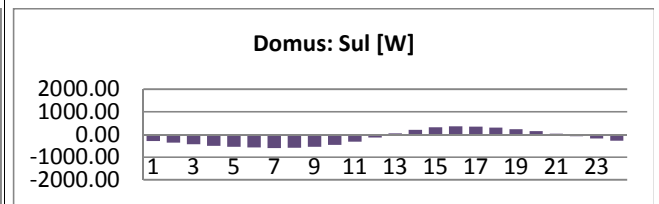
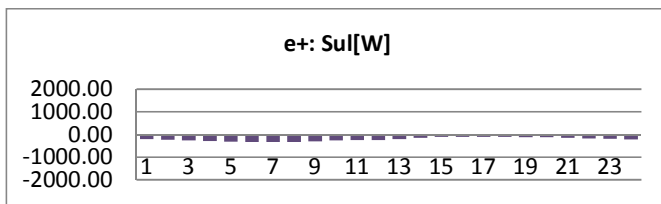
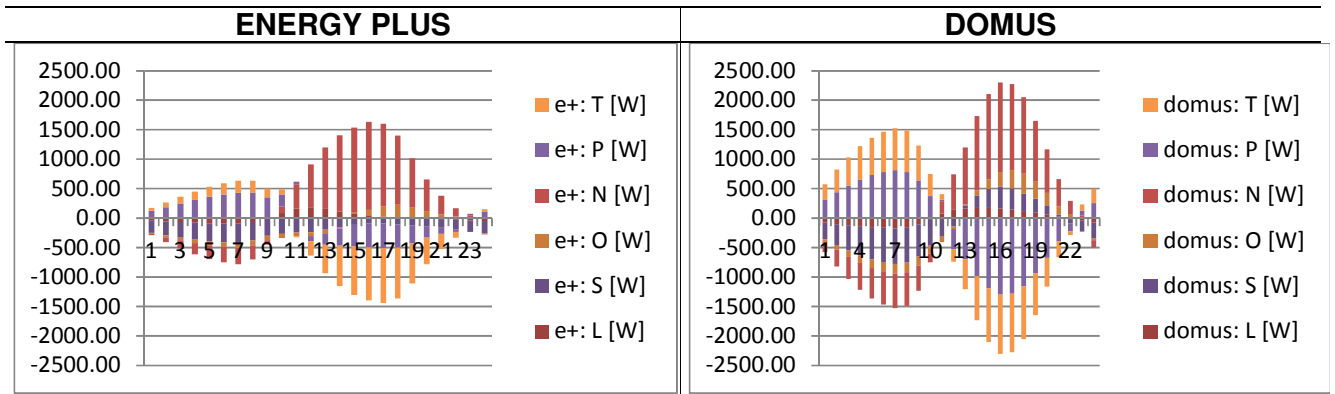


Figura 20: Ganhos térmicos o Domus e no Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) na multizona sem janelas no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies sul, piso e teto no 3º andar

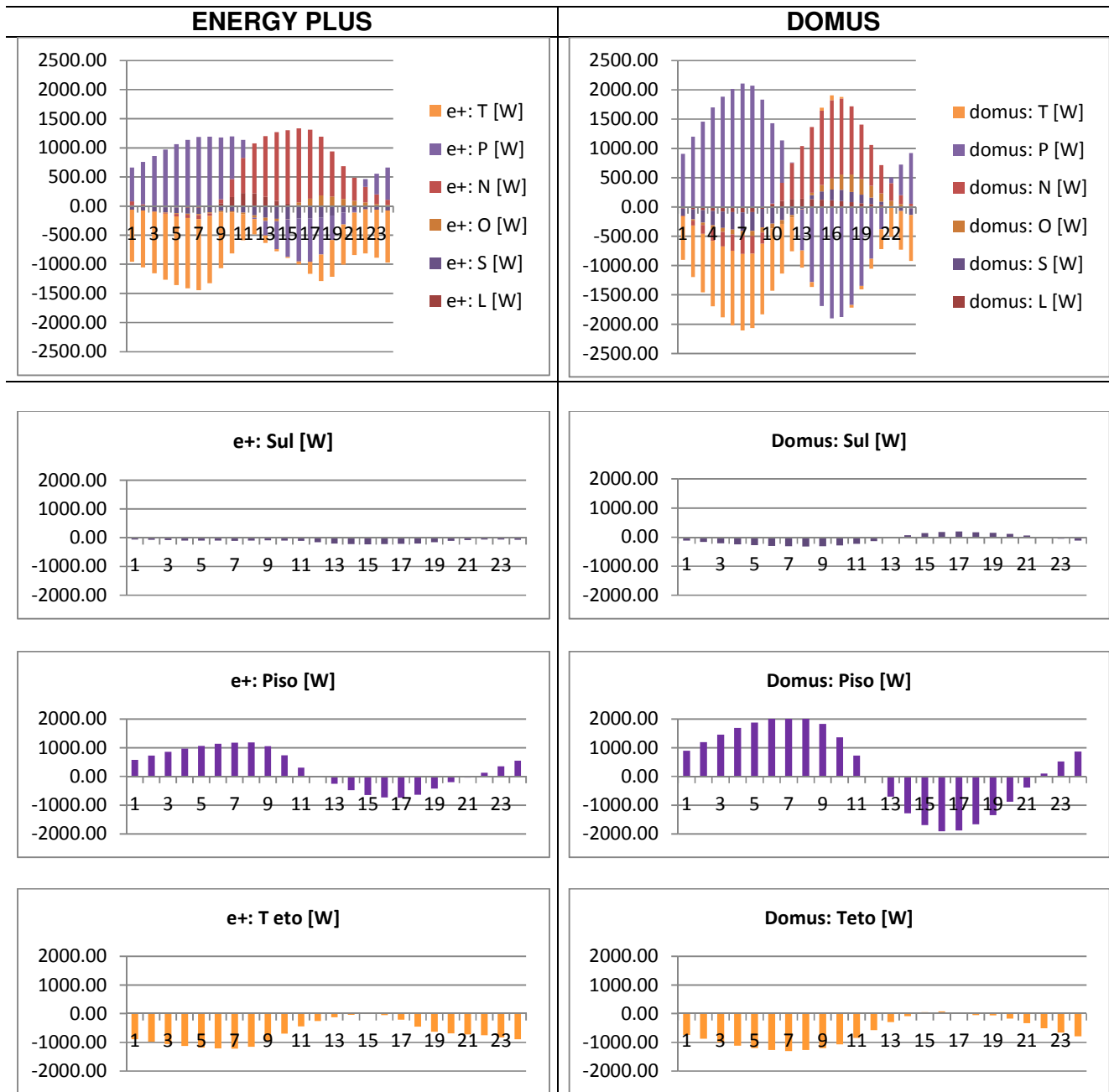


Figura 21: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies sul, piso e teto no 5º andar

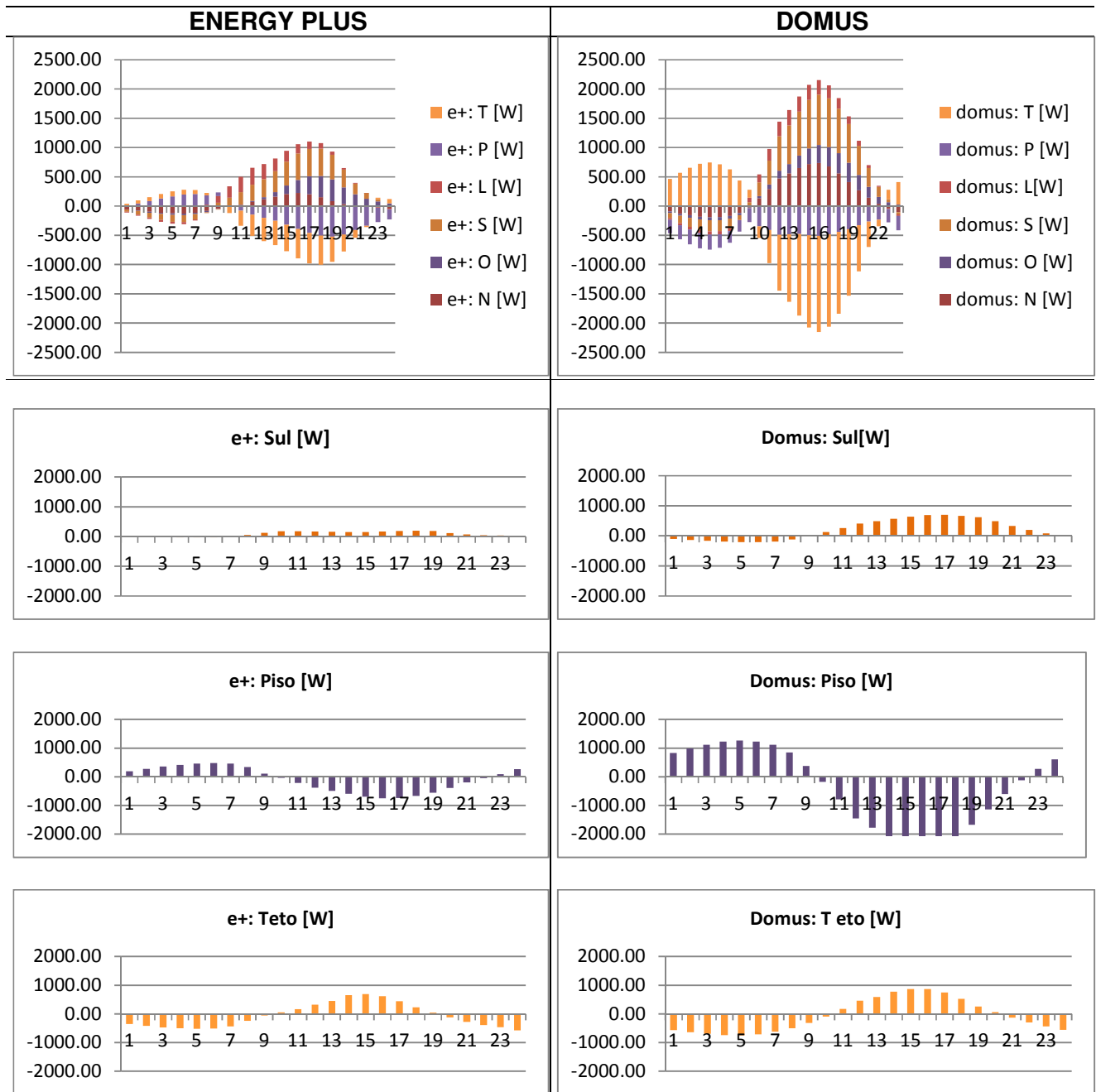


Figura 22: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies sul, piso e teto no 1º andar

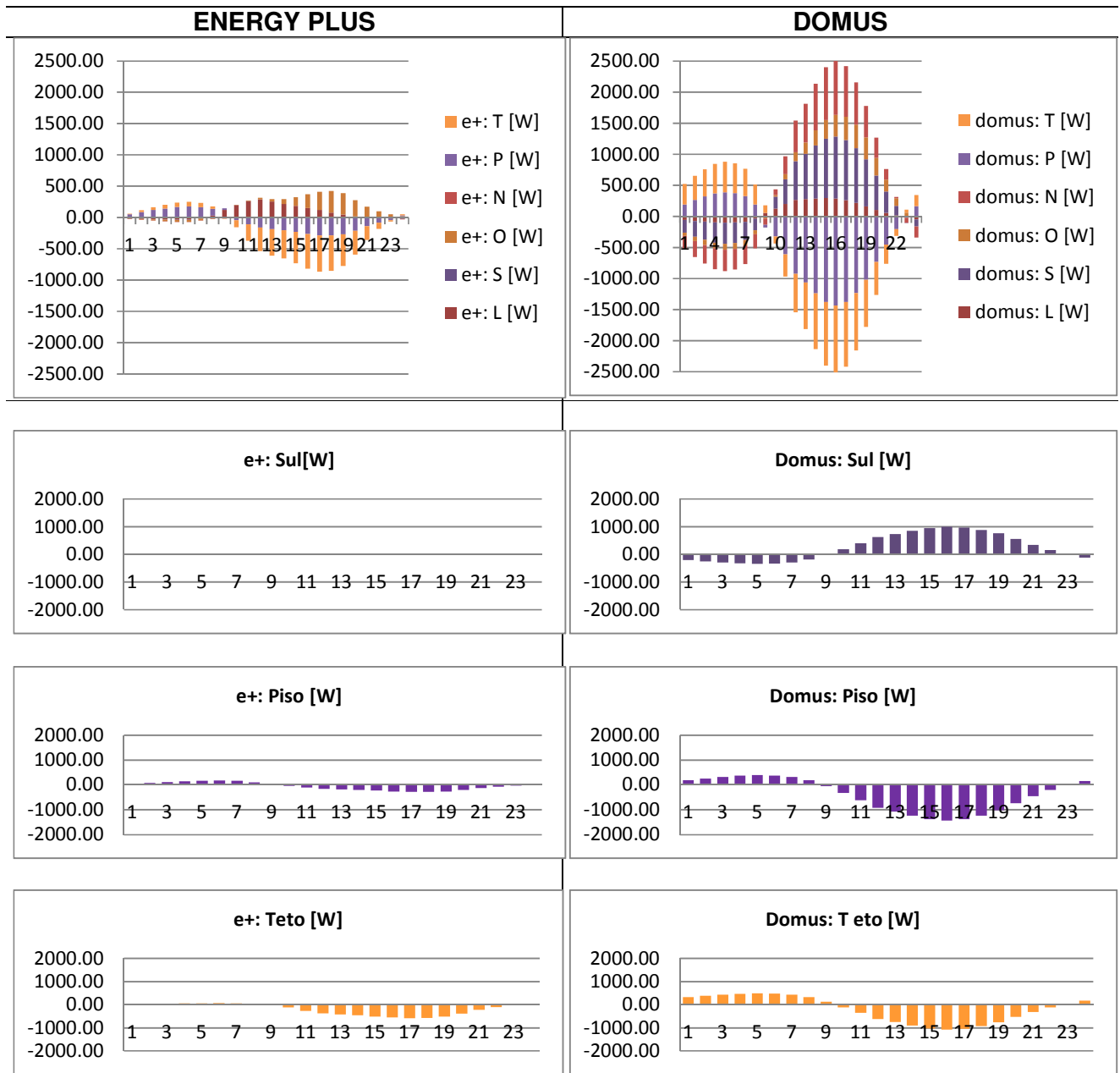


Figura 23: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies sul, piso e teto no 3º andar

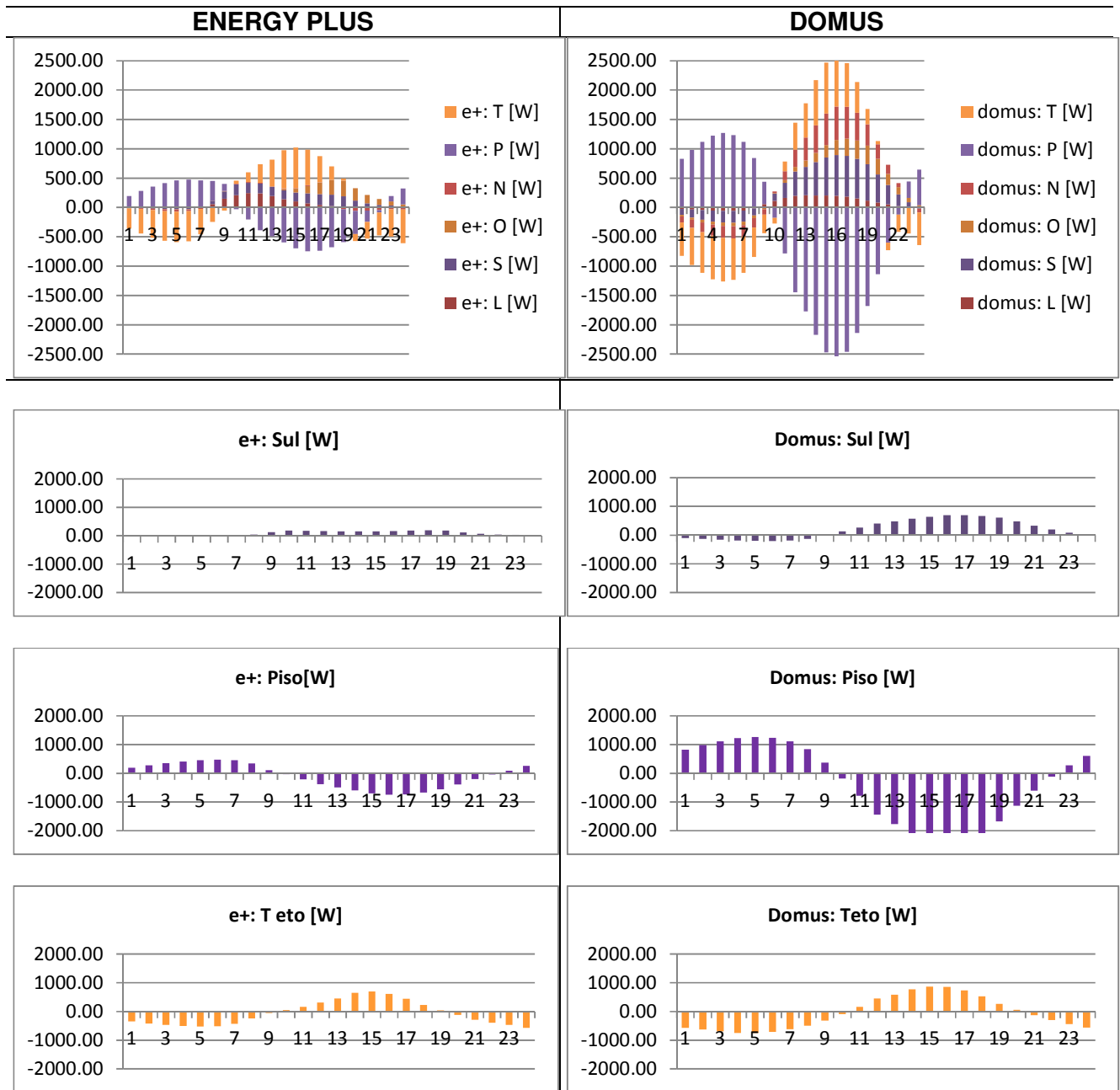


Figura 24: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies sul, piso e teto no 5° andar

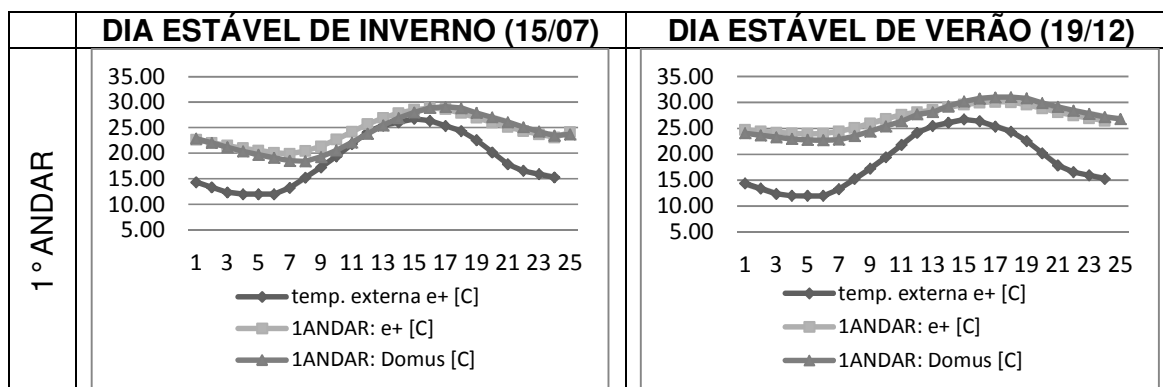
4.4 Multizona com janelas

Os resultados obtidos nas simulações de temperatura interna para o protótipo de multizonas com janela nos programas Domus e no Energy Plus obtiveram diferenças maiores que as obtidas na multizonas sem janelas, apresentando, em alguns andares, pela primeira vez no Domus temperaturas menores que as do Energy Plus. Esses dados podem ser verificados na Tabela 11. Apesar disso, a diferença de temperatura é considerada dentro da faixa aceitável.

Tabela 11: Temperatura externa e interna nos programas Domus e Energy Plus na multizonas com janelas

	Temp. externa (°C)	Energy Plus (°C)	Domus (°C)	MDB	RMSD
1° andar	22.0	25.0	25.4	1.52%	5.59%
2° andar	22.0	27.1	26.4	-2.76%	4.83%
3° andar	22.0	27.8	27.0	-2.77%	4.44%
4° andar	22.0	27.4	27.2	- 0.66%	3.18%
5° andar	22.0	25.8	26.2	1.32%	3.51%

Na análise de um dia estável de inverno (15/07) e um dia estável de verão (19/12), como pode ser visto no Gráfico 26, observa-se que tanto no verão quanto no inverno a temperatura do Domus é menor que a do Energy Plus. As maiores diferenças ocorreram no segundo e terceiro andar, que variou no inverno de 7,38% a 7,70% de superestimação e no verão de 4,09% e 3,68% de superestimação do Energy Plus em relação ao Domus.



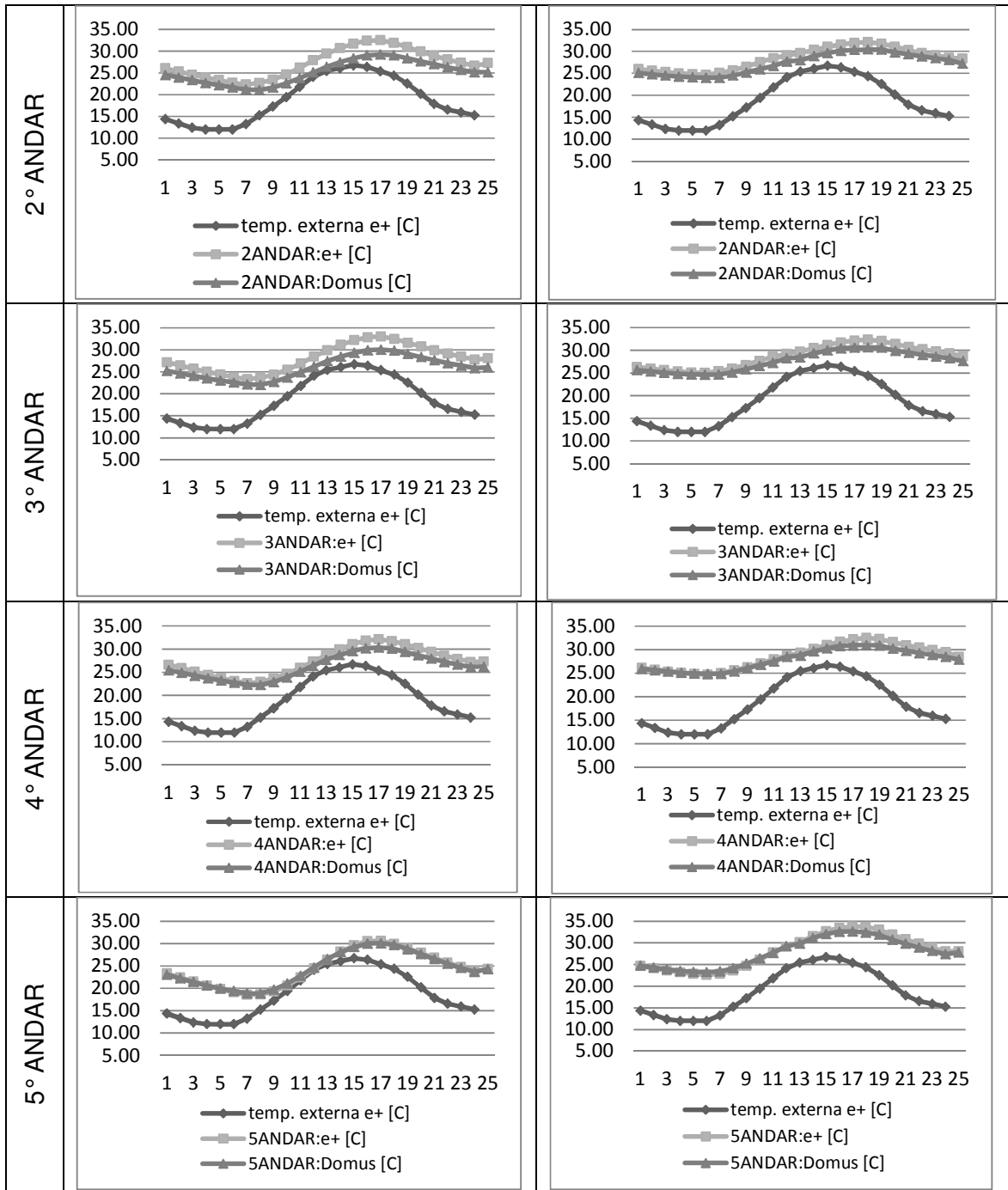


Gráfico 26: Temperaturas externas e internas do Domus e do Energy Plus em um dia estável de inverno (15/07) e dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas com janelas

Os graus hora anual dos dois programas obtiveram diferenças próximas as do protótipo de multizonas sem janelas, com destaque para os andares intermediários que pela primeira vez, nos graus hora de resfriamento, a média foi menor no Domus que no Energy Plus como pode ser verificado na Tabela 12. Essas diferenças

variaram de 0,2°C a 0,7°C de temperatura entre os programas, o que resultou nesses andares, em uma diferença percentual de 0,66% a 2,42%. Os graus hora de aquecimento se mostraram tão mínimas que a diferença entre os programas foi de no máximo 0,03%, também apresentando dentro da faixa aceitável. Os comportamentos da temperatura interna nos dois programas estão demonstrados do Gráfico 27 ao Gráfico 31.

Tabela 12: Graus hora de aquecimento e de resfriamento do Domus e Energy Plus

Graus hora	andar	Diferença média anual de temperatura fora da faixa de conforto ($T_{Domus}-T_{e+}$)	MDB	RMSD
aquecimento	1° andar	0.01°	0.03%	0.42%
	2° andar	0.0°	0.00%	0.00%
	3° andar	0.0°	0.00%	0.00%
	4° andar	0.0°	0.00%	0.00%
	5° andar	0.01°	0.02%	0.33%
resfriamento	1° andar	0.6°	2.24%	8.70%
	2° andar	- 0.6°	- 2.20%	7.89%
	3° andar	- 0.7°	- 2.42%	8.75%
	4° andar	- 0.2°	- 0.66%	5.36%
	5° andar	0.1°	0.58%	0.08%

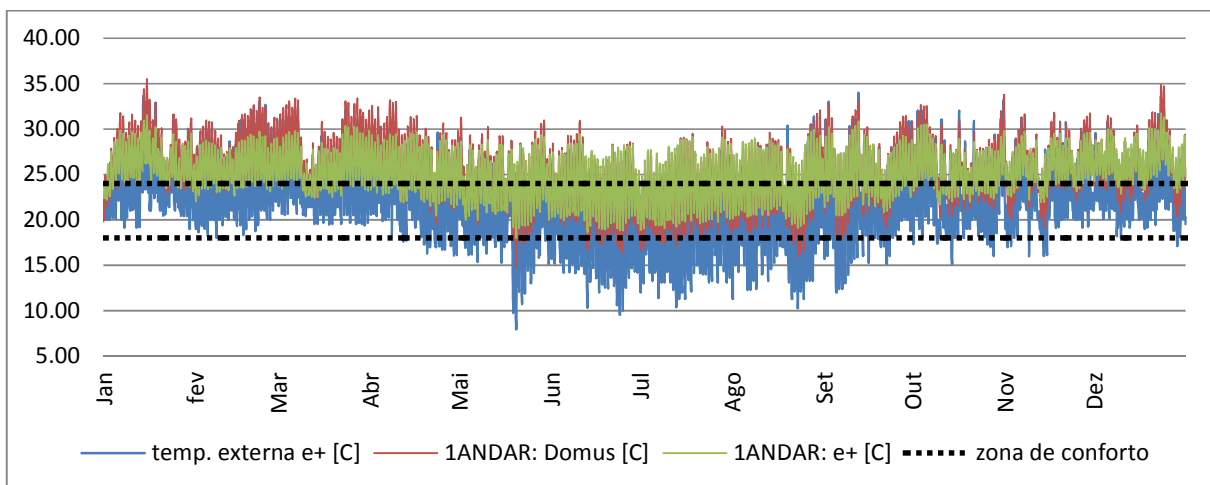


Gráfico 27: Temperatura horária anual externa e interna do Domus e do Energy Plus com delimitação das temperaturas máxima e mínima para o cálculo dos graus-hora do primeiro andar

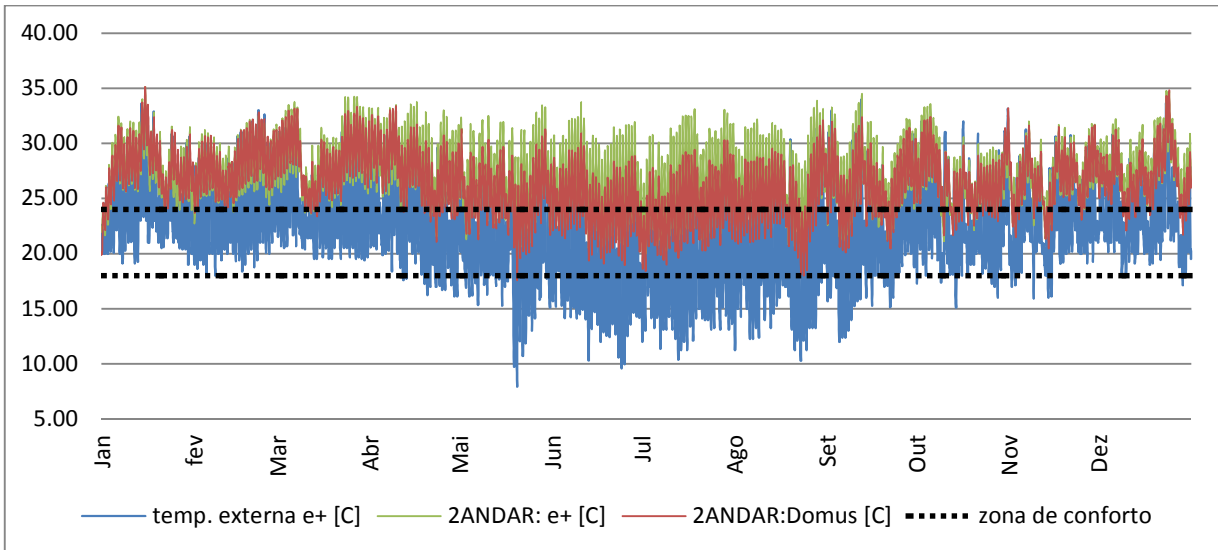


Gráfico 28: Temperatura horária anual externa e interna do Domus e do Energy Plus com delimitação das temperaturas máxima e mínima para o cálculo dos graus-hora do segundo andar

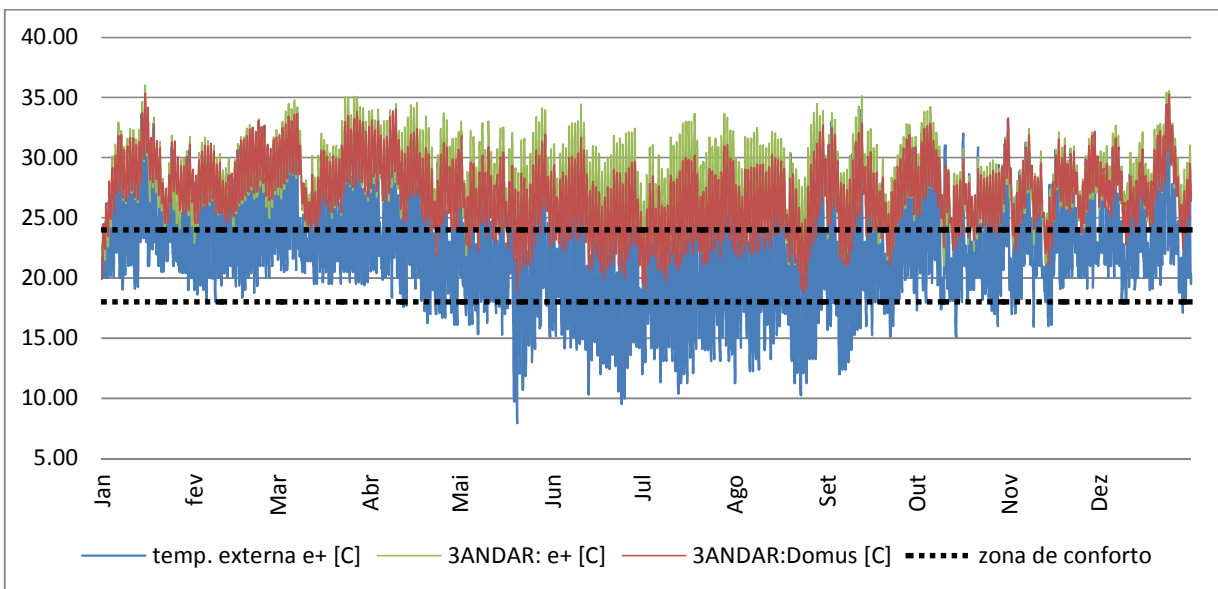


Gráfico 29: Temperatura horária anual externa e interna do Domus e do Energy Plus com delimitação das temperaturas máxima e mínima para o cálculo dos graus-hora do terceiro andar

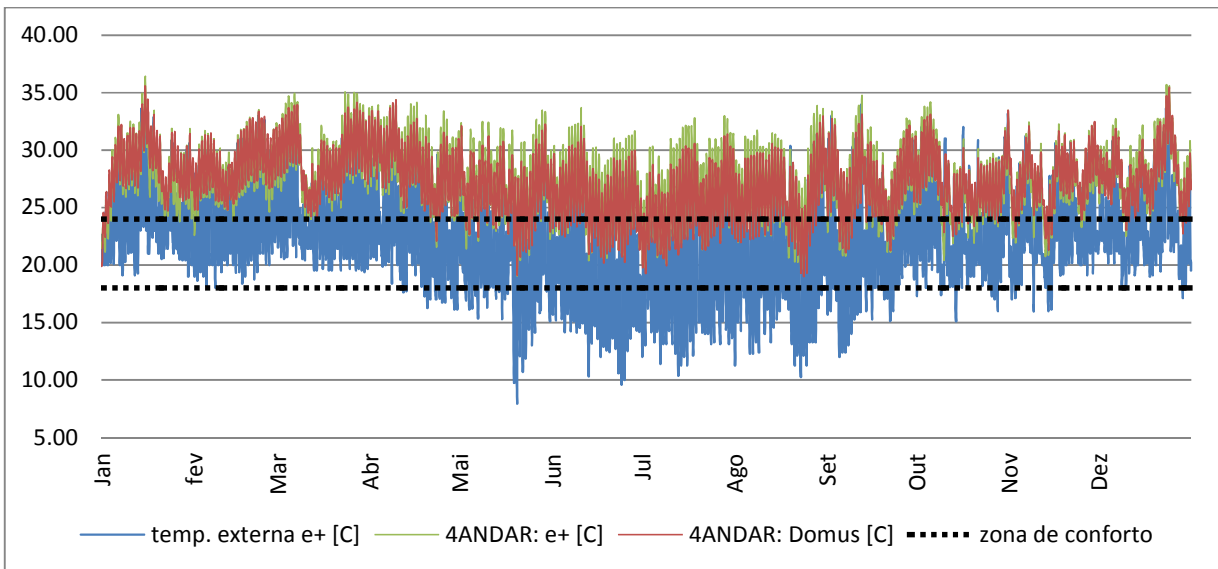


Gráfico 30: Temperatura horária anual externa e interna do Domus e do Energy Plus com delimitação das temperaturas máxima e mínima para o cálculo dos graus-hora do quarto andar

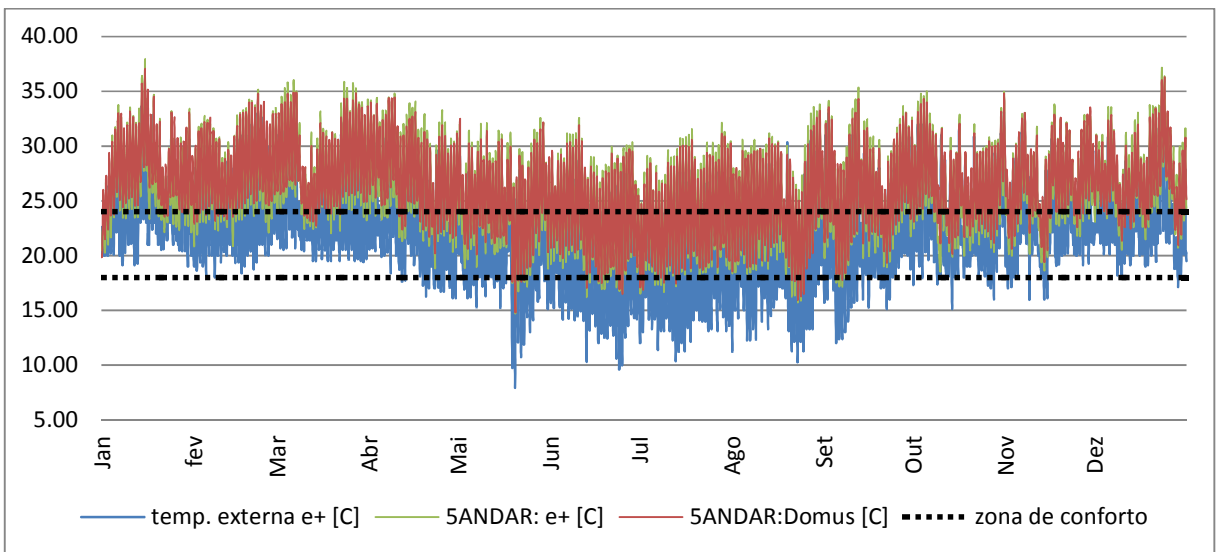


Gráfico 31: Temperatura horária anual externa e interna do Domus e do Energy Plus com delimitação das temperaturas máxima e mínima para o cálculo dos graus-hora do quinto andar

Apesar da diferença entre os graus hora terem sido pequenas, foram feitos testes para verificar o comportamento dos ganhos térmicos nas superfícies dos cinco pavimentos do protótipo de multizonas com janelas. No Gráfico 32 mostram-se os ganhos térmicos de todas as superfícies inclusive das janelas. Como os ganhos pelas janelas são os maiores ganhos e eles têm o mesmo comportamento nos dois programas, retiraram-se os ganhos das janelas para verificar o comportamento das

superfícies opacas, como demonstrado do Gráfico 33 ao Gráfico 37. Os outros gráficos que apresentam as janelas estão apresentados no Anexo B.

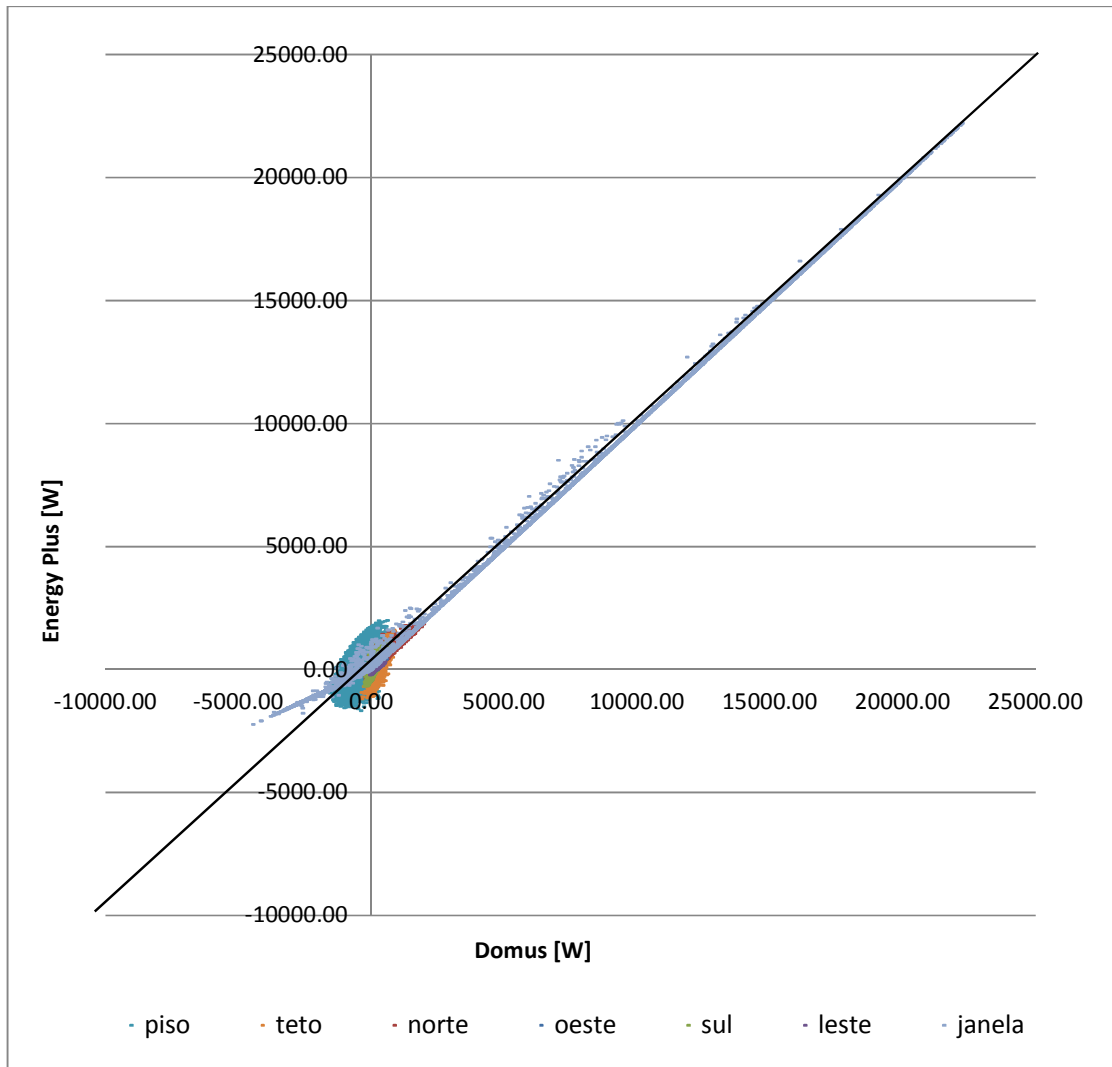


Gráfico 32: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no primeiro pavimento no protótipo de multizonas com janelas: todas as superfícies

Verificou-se que no primeiro pavimento, como pode ser demonstrado no Gráfico 33, que a maior dispersão dos dados acontece na superfície do piso, com uma superestimação dos dados do Domus em relação ao Energy Plus. No segundo e terceiro pavimentos (Gráfico 34 e Gráfico 35), as divergências dos ganhos térmicos são semelhantes, ocorrendo à superestimação dos dados de teto e piso e subestimação dos dados da superfície sul do Domus em relação ao Energy Plus. Já no quarto e quinto pavimentos (Gráfico 36 e Gráfico 37), há uma superestimação

dos dados do teto e uma subestimação dos dados da superfície norte, sul e piso do Domus em relação ao Energy Plus. Essas divergências já ocorriam na multizonas sem janela, não alterando o comportamento para o protótipo de multizonas com janelas.

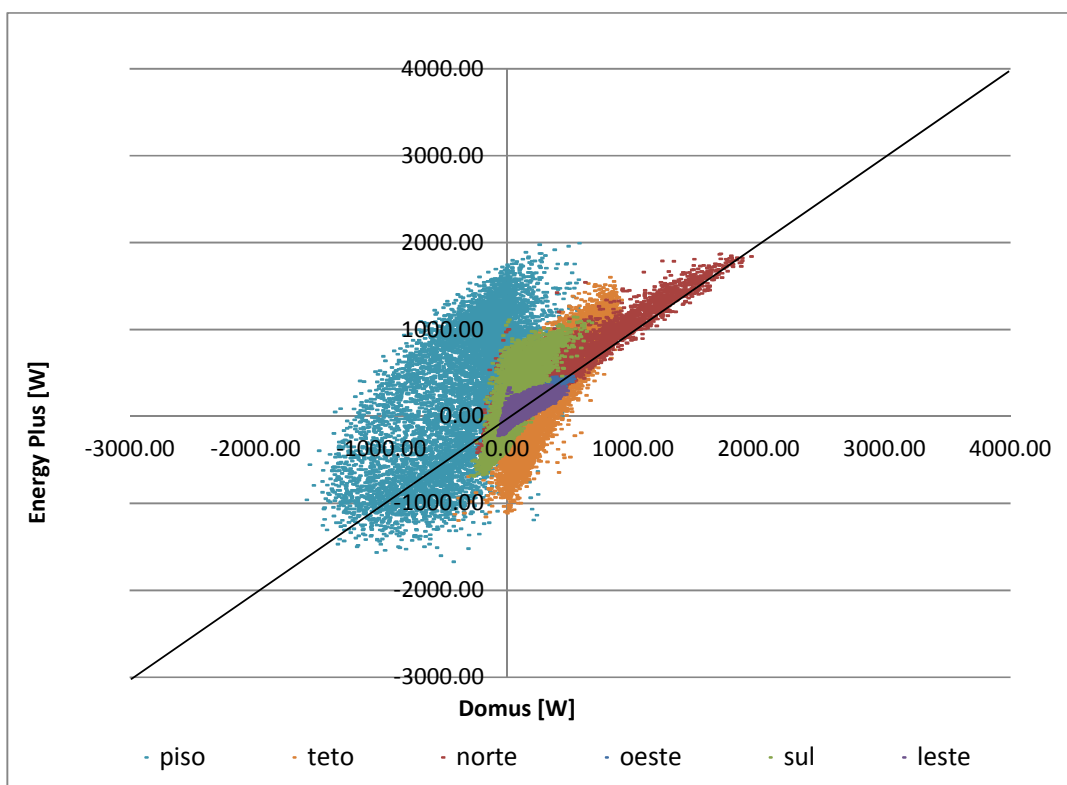


Gráfico 33: Regressão dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no primeiro pavimento no protótipo de multizonas com janelas para as superfícies opacas

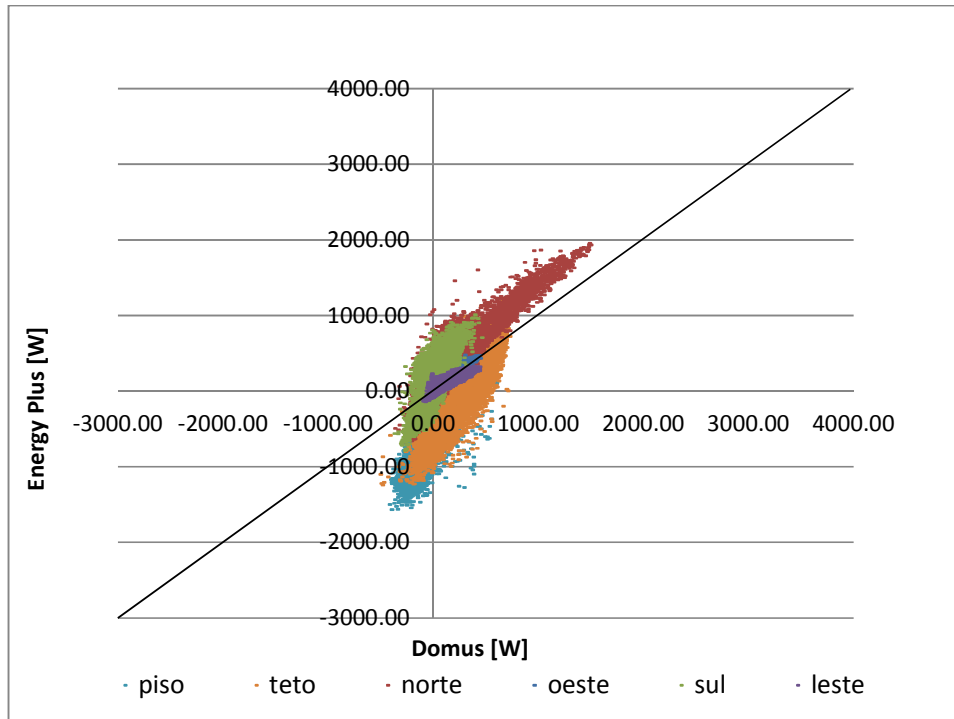


Gráfico 34: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no segundo pavimento no protótipo de multizonas com janelas para as superfícies opacas

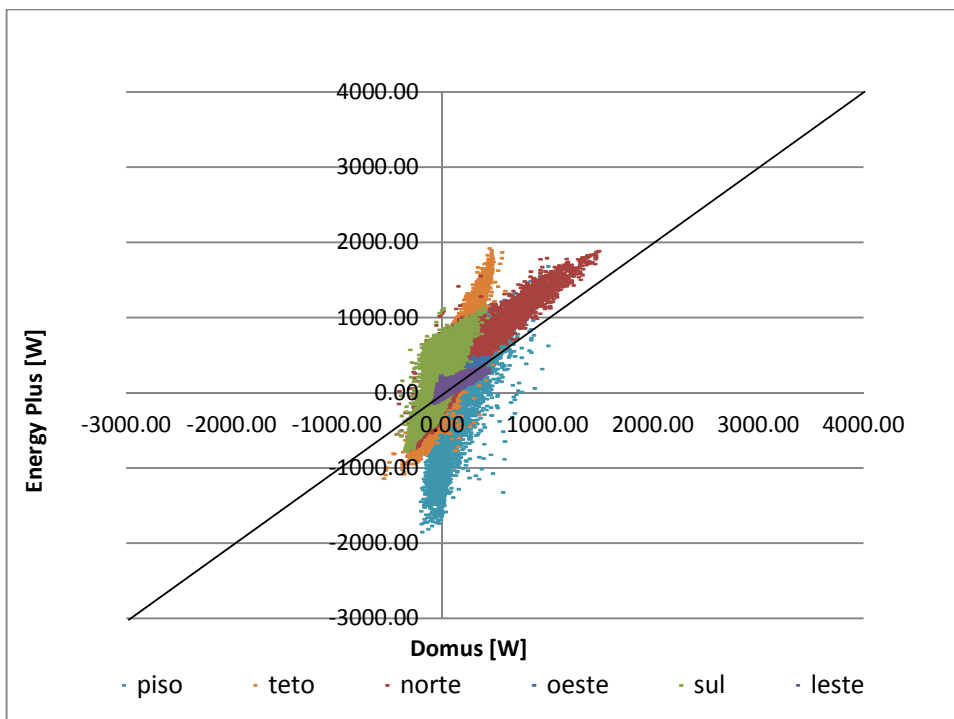


Gráfico 35: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no terceiro pavimento no protótipo de multizonas com janelas para as superfícies opacas

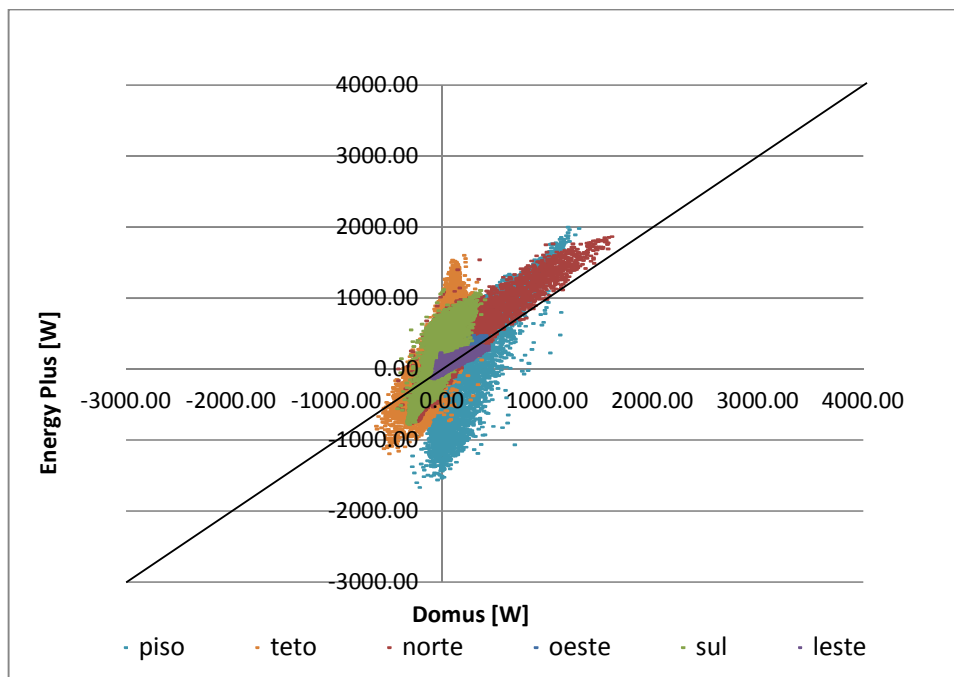


Gráfico 36: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no quarto pavimento no protótipo de multizonas com janelas para as superfícies opacas

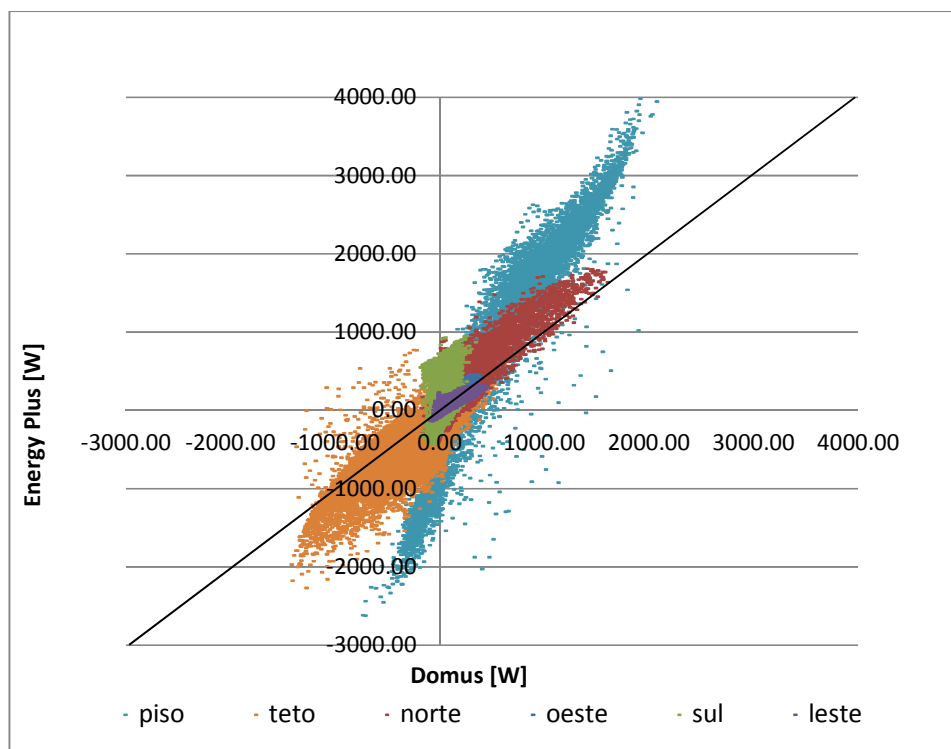
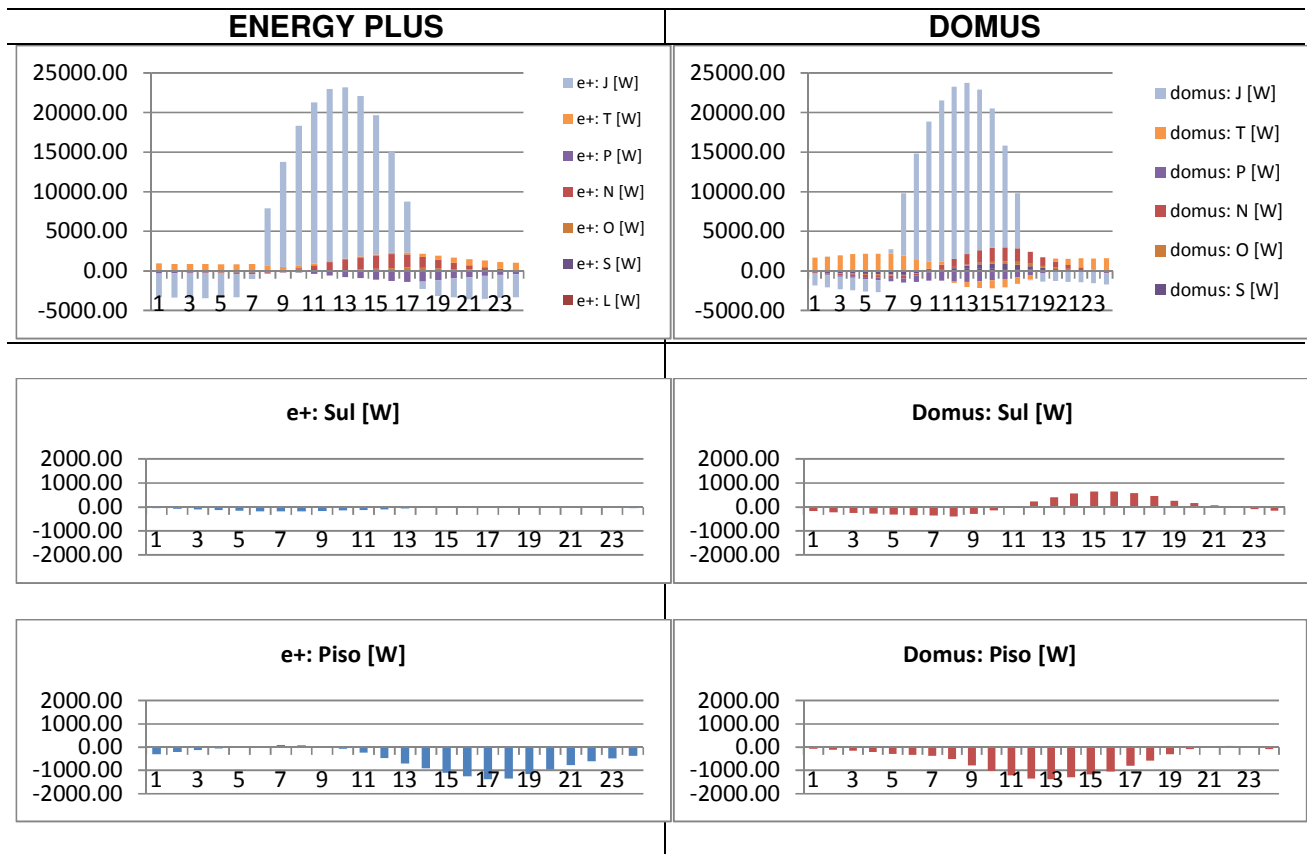


Gráfico 37: Regressão linear dos ganhos térmicos no Domus e no Energy Plus no quinto pavimento no protótipo de multizonas com janelas para as superfícies opacas

Analisando um dia estável de inverno (15/07) e um dia estável de verão (19/12), considerou-se somente o andar inferior, o andar intermediário e o superior para fazer uma análise do comportamento das cargas térmicas nos ambientes. Conforme demonstrado da Figura 25 à

Figura 30, confirmou-se que as maiores diferenças ocorriam nas superfícies sul, teto e piso em todas as três superfícies analisadas, além da superfície norte no dia estável de verão. A superestimação dos dados da superfície de teto e piso quando este está em contato com outro ambiente é significativo tanto no verão quanto no inverno (teto do primeiro pavimento, teto e piso do terceiro pavimento e piso do quinto pavimento). Os ganhos térmicos das outras superfícies estão demonstrados no Anexo A.



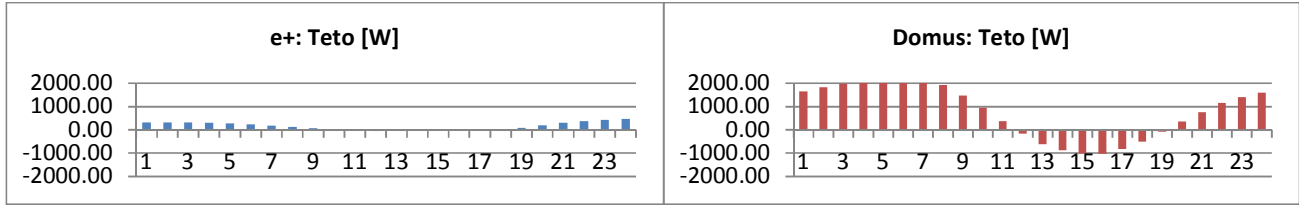


Figura 25: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies sul, piso e teto no primeiro andar

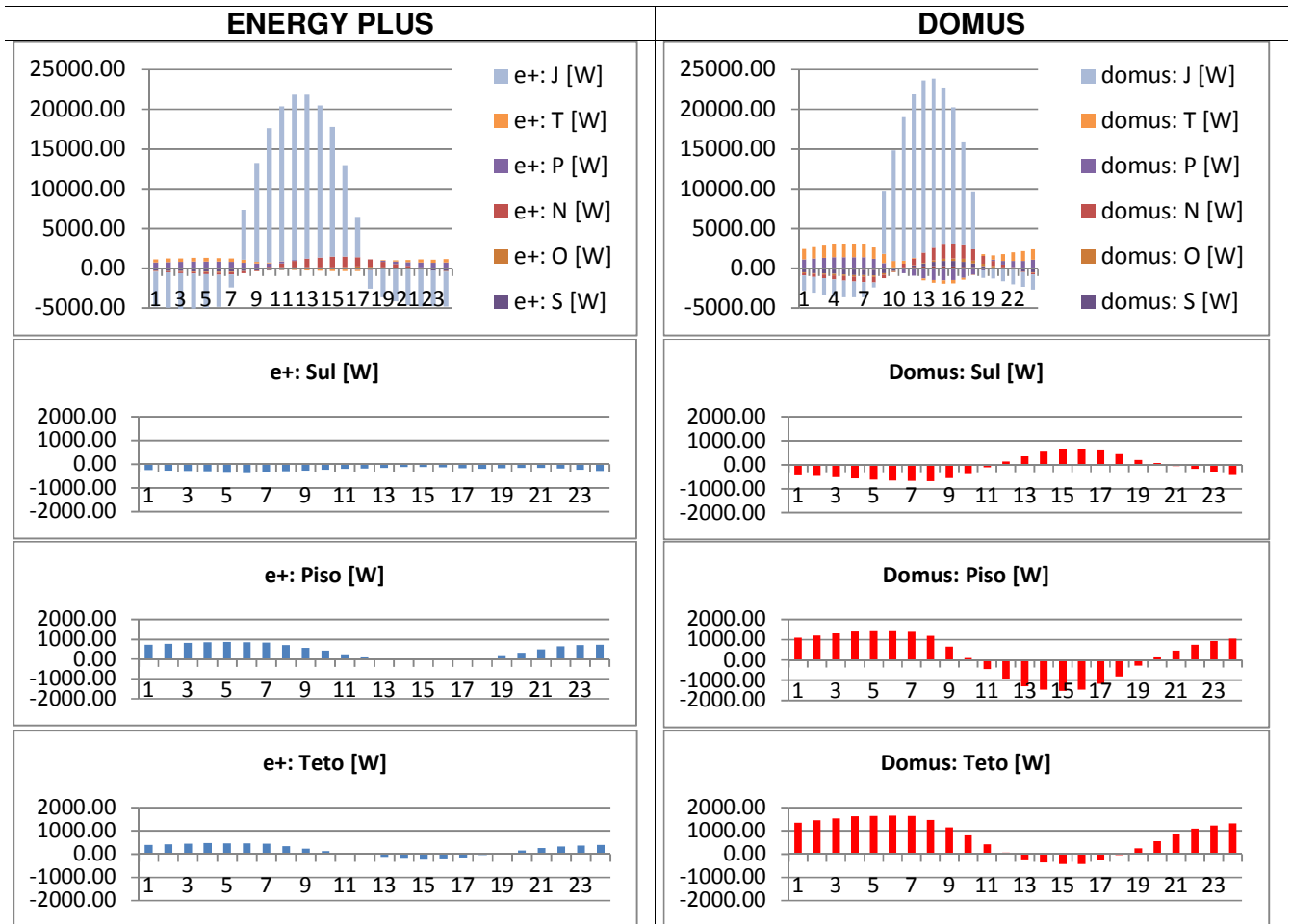


Figura 26: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies sul, piso e teto no terceiro andar

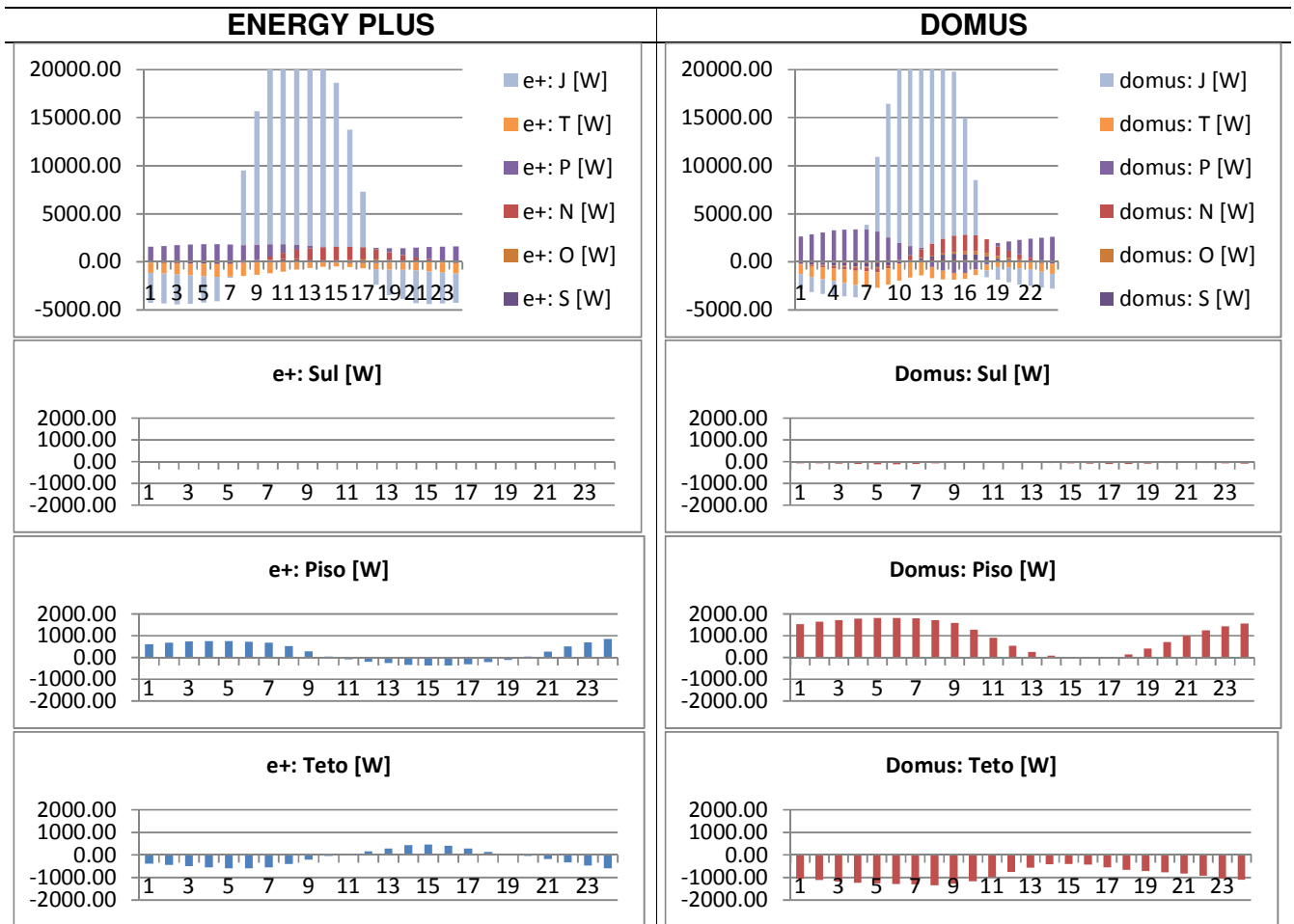


Figura 27: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies sul, piso e teto no quinto andar

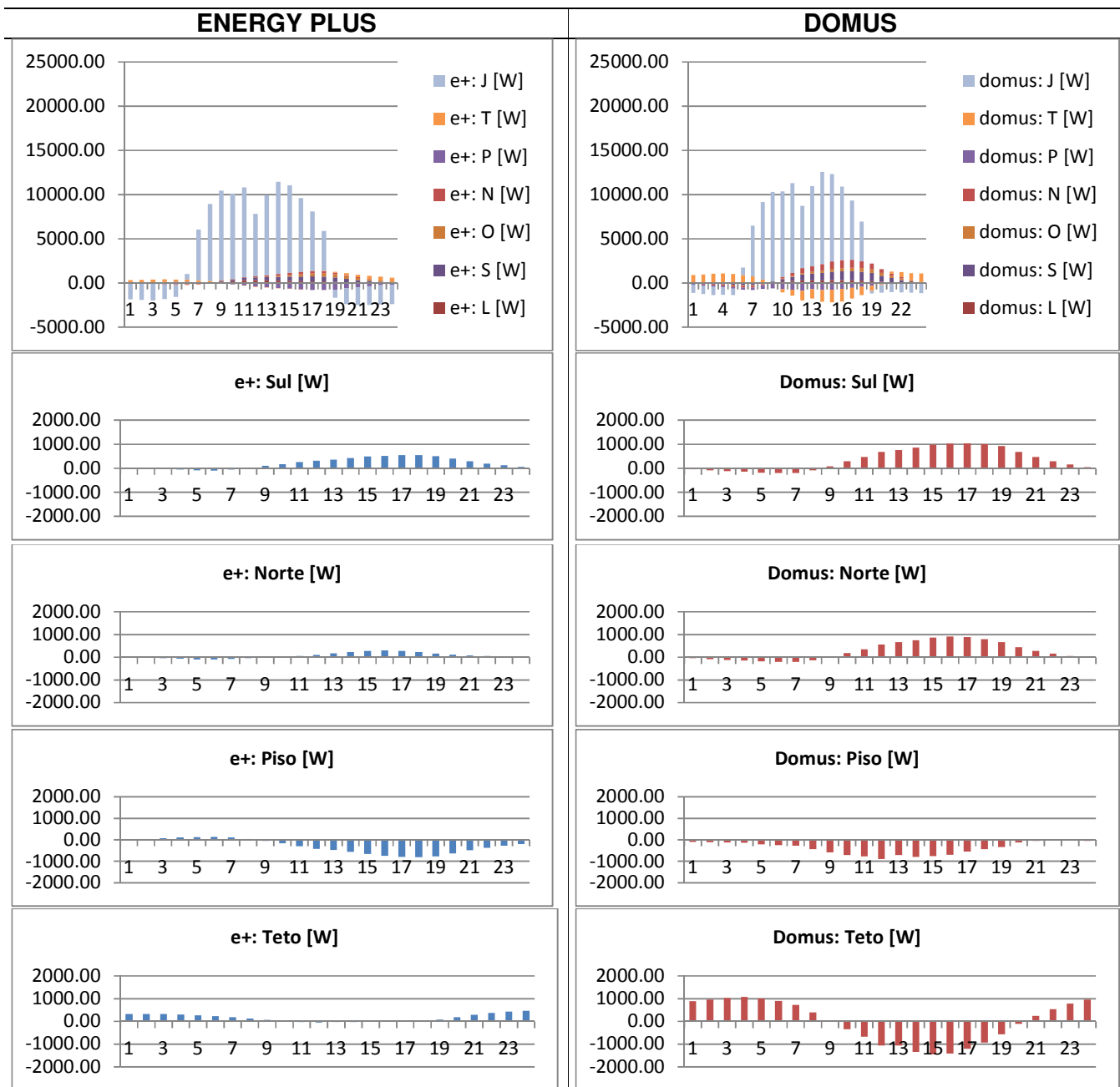


Figura 28: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies sul, norte, piso e teto no primeiro andar

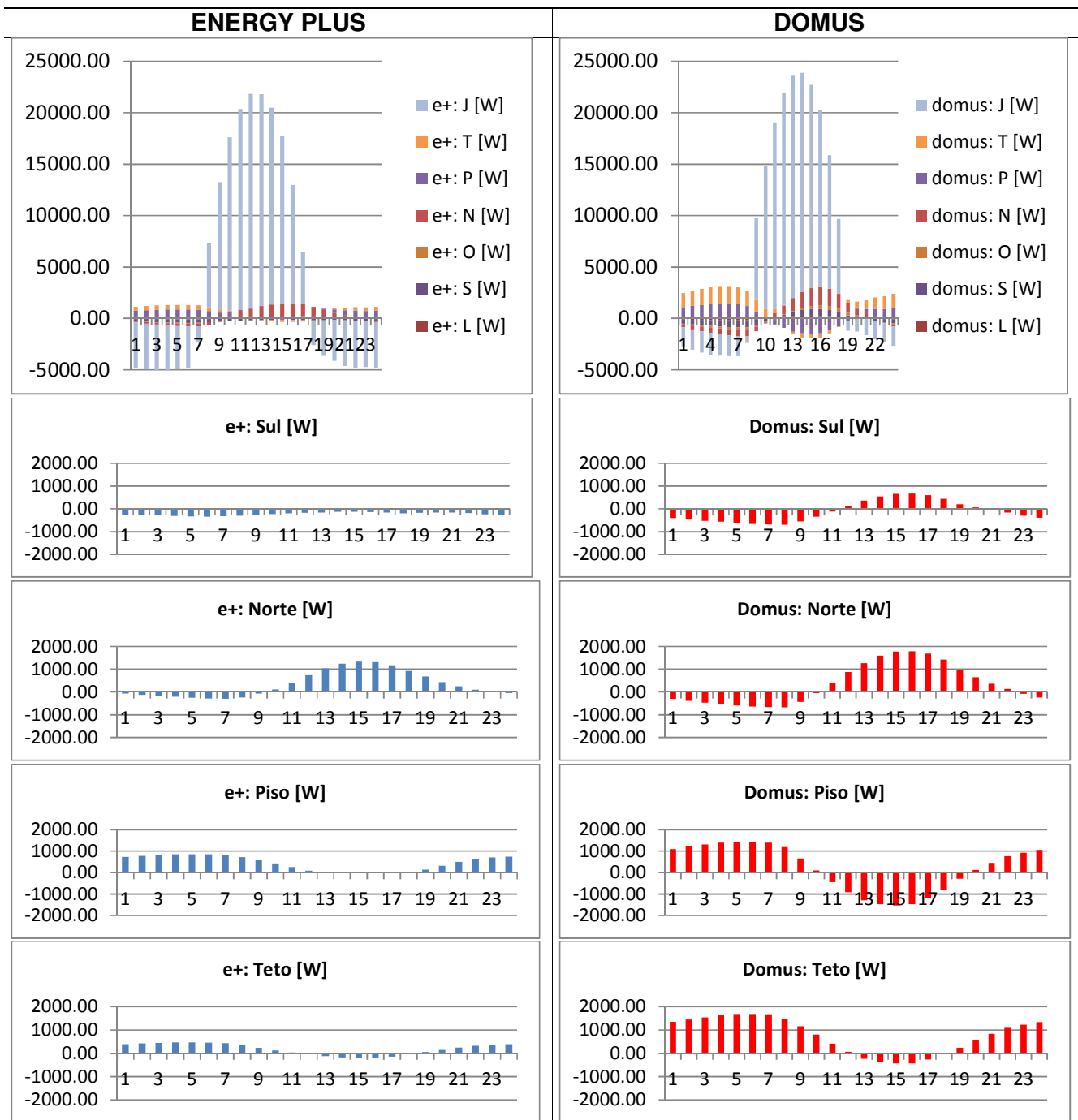


Figura 29: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies sul, norte, piso e teto no terceiro andar



Figura 30: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies sul, norte, piso e teto no quinto andar

5. CONCLUSÕES

5.1 Conclusões Gerais

Com o objetivo de fazer uma avaliação comparativa entre o programa Domus e o programa Energy Plus em relação a alguns itens estabelecidos pelos pré-requisitos dos programas de simulação no Regulamento Técnico do Nível de Eficiência Energética nos Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), inicialmente foi necessário estudar os dois programas de forma a identificar quais pré-requisitos eram passíveis de uma análise comparativa para essa pesquisa. Após a escolha destes itens, foram definidos protótipos no qual seria possível realizar as simulações. Com isso, foram definidos quatro protótipos para fazer as análises propostas e intitulados de: monozona sem janela, monozona com janela, multizona sem janela e multizona com janela, cujas dimensões e componentes construtivos foram descritos no capítulo de metodologia (Capítulo 3).

Através da análise das simulações destes protótipos pode-se observar que as temperaturas internas médias anuais dos dois programas se mostraram bastante próximas, obtendo uma superestimação do Domus em relação ao Energy Plus de 2,75% a 5,73% nos protótipos de monozona e de nos protótipos de multizonas os valores variaram de 0,35 a 2,53% quando avaliados os protótipos de multizonas sem janelas sendo que esta variação se invertia nos protótipos de multizonas com janelas, acontecendo à subestimação do Domus em relação ao Energy Plus de 0,66 a 2,77% nos andares intermediários. Os valores obtidos para a temperatura média anual do Domus foram considerados dentro de uma faixa aceitável de erro.

Foi feita também uma avaliação do desvio horário no cálculo das temperaturas internas feitas pelos dois programas através da metodologia de cálculo de graus horas, tendo-se estabelecido como limites para sua determinação as temperaturas de acima de 24° C e abaixo de 18° C.

Com relação aos graus hora de resfriamento, as maiores divergências ocorreram nos protótipos de monozonas, onde variaram de 63,2% a 77,9% de superestimação dos graus hora anuais do Domus em relação ao Energy Plus. Já na diferença média diária, na monozona sem janela essa diferença foi 0,7°C nos graus hora de resfriamento e de 0,1 °C nos graus hora de aquecimento, correspondendo a 2,7% e

0,5% respectivamente. A mesma diferença entre os programas ocorreu na monozona com janela, mas com uma diferença percentual de 3,2% nos graus hora de resfriamento e 0,3% de aquecimento.

Nos protótipos de multizonas, as diferenças entre os programas foram menores principalmente nos andares intermediários, que são aqueles que têm menos superfícies expostas ao exterior, variando de 0,02% a 0,15% de superestimação dos graus hora de aquecimento do Domus em relação ao Energy Plus e no protótipo de multizonas com janela, essa diferença foi menor, tendo no máximo 0,03% de diferença entre os programas.

Com relação à análise dos graus hora de resfriamento, o comportamento das multizonas sem janelas e com janelas foram opostas. Na multizona com janela, nos andares intermediários, os graus hora entre os programas foram maiores no Energy Plus que no Domus, ocorrendo diferenças de 0,66% a 2,42% nesses andares. Diferentemente no multizona sem janela que essas diferenças ocorreram de 0,32% a 1,39% de superestimação do Domus em relação ao Energy Plus.

Para verificar a razão das diferenças das temperaturas internas e dos graus hora de resfriamento e aquecimento, verificaram-se então, os ganhos térmicos por superfície. O que se observou foi que as maiores diferenças ocorreram nas superfícies sul, no piso e no teto. Os erros eram maiores nas multizonas, quando havia contato entre as zonas, no caso de teto e piso. Recomenda-se que esse erro deve ser verificado no Domus para aprimoramento da saída de dados das trocas térmicas entre zonas.

Com esse estudo foi possível fazer a análise comparativa do Domus em relação ao Energy Plus, verificando que apesar das diferenças, o programa Domus mantém uma semelhança nas divergências encontradas, o que sugere que estas podem se dever a uma diferença nos modelos matemáticos dos dois programas.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

A partir do desenvolvimento do trabalho e com base nos resultados, sugere-se que para futuros trabalhos e estudos a serem realizados:

- a) Aplicação dos outros pré-requisitos para programas de simulação do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), com a comparação com outro programa de simulação termoenergético;
- b) Analisar e comparar os resultados em outros climas e zonas bioclimáticas;
- c) Analisar e comparar os resultados de outros materiais e composição de materiais nas superfícies para verificar o comportamento térmico dos ambientes;
- d) Avaliar e comparar os resultados do comportamento térmico das multizonas horizontais;
- e) Avaliar e comparar o método de simulação proposta para o programa Domus.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABADIE M.O. DOMUS Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007. DOMUS – PROCEL EDIFICA Version Beta. Validation Report for ELETROBRÁS/APC-PUCPR (Grant # ECV 283/2008), Thermal Systems Laboratory (LST), Pontifical Catholic University of Paraná (PUCPR), December 2010, 44p.

ABADIE M.O. DOMUS Testing – Additional Validations and Verifications. DOMUS – PROCEL EDIFICA Version Beta. Validation Report for ELETROBRÁS/APC-PUCPR (Grant # ECV 283/2008), Thermal Systems Laboratory (LST), Pontifical Catholic University of Paraná (PUCPR), May 2011, 79p.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers. Standard 140-2001: Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs. Atlanta, 2001.

_____. ASHRAE 1052-RP: Development of an analytical verification test suite for whole building energy simulation programs – building fabric. Oklahoma State University, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações – parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

BEN - Balanço Energético Nacional. Relatório final. Ano base 2009. Rio de Janeiro: EPE. 2010.

BRASIL. Decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001. Regulamenta a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. Brasília, DF, 2001b. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/qualidade/decreto4059.pdf>>. Acesso em: 24 fev. 2007.

_____. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Brasília, DF, 2001a.

Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/qualidade/lei10295.pdf>>. Acesso em: 24 fev. 2007.

_____. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). Portaria nº 372, de 17 de setembro de 2010. Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C). Brasília, DF, 2010a. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/projetos/etiquetagem/comercial/downloads>>. Acesso em: maio de 2011

_____. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). Portaria nº 395, de 11 de outubro de 2010. Regulamento de Avaliação da Conformidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RAC-C). Brasília, DF, 2010b. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/Volume_3_RAC_C_Portaria_395_de_11_10_2010.pdf>. Acesso em: maio de 2011.

_____. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). Portaria nº 449, de 25 de novembro de 2010. Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais (RTQ-R). Brasília, DF, 2010c. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/RTQ-R-Portaria%20449%20de%2025-11-2010.pdf>>. Acesso em: maio de 2011.

BUORO, A.B.; VOSGUERICHIAN, A.B.; BENEDETTO, G.S.; VITTORINO, F. Análise comparativa na simulação de modelo habitacional nos softwares Energy Plus e Tas. In: XI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Anais...Florianópolis: ENTAC, 2006.

CARLO, J. C. Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento de Edificações Não-Residenciais. 2008. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. Elaboração de protótipos para simulação do desempenho termoenergético de edificações. In: XI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Anais... Florianópolis: ENTAC, 2006.

CARLO, J.C., LAMBERTS, R. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios – parte 2: método de simulação. Ambiente Construído. Porto Alegre. V.10,n.2. p 27-40, 2010.

CRAWLEY, Drury B, Linda K Lawrie, Curtis O Pedersen, Frederick C Winkelmann. 2000. "EnergyPlus: Energy Simulation Program," in ASHRAE Journal, Vol. 42, No. 4 (April), pp. 49-56.

DOE. EnergyPlus Manual: Getting Started and Overview. 2010. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>> Acesso em: novembro de 2010.

Domus - Procel Edifica (2011). Programa de Simulação Termoenergético – versão beta 2011. Atualizado em 10 de novembro de 2011. (<http://domus.pucpr.br/>)

GELLER, Haward S. Revolução energética: política para um futuro sustentável; tradução Maria Vidal Barbosa; revisão técnica Marcio Edgar Schuler. - Rio de Janeiro: Relume Dumará: USAid, 2003. ISBN 85-7316-336-4

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

Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia - IPAM. Disponível em: <<http://www.ipam.org.br>>. Acesso em 15 de Julho de 2011.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT. Relatório Técnico de no. 72.919-205. Validação de softwares aplicativos para simulação do comportamento técnico de habitações. Divisão de Engenharia Civil, Agrupamento de Componentes e sistemas Construtivos. São Paulo, outubro de 2004.

JENSEN, S. O. Validation of building energy simulation programs: a methodology. Energy and Buildings, [S.l.]: Elsevier, v. 22, p. 133-144, 1995.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.. Eficiência energética na arquitetura. São Paulo: PW Editores, 1997. p. 192.

.MENDES, N., ABADIE, M.O.. Power Domus - Manual do Usuário, 2008. Disponível em: <http://www2.pucpr.br/educacao/lst/software_powerdomus.html>. Acesso em 15/01/2011.

MENDES, N.; RIDLEY, I.; LAMBERTS, R.; PHILIPPI, P. C.; BUDAG, K. Umidus: a PC Program for the prediction of heat and mass transfer in porous building elements. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE (BUILDING SIMULATION), 6., 1999, Kyoto. Proceedings... Kyoto, Japão: IBPSA, 1999. v. 1, p. 277-283.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; NETO, J. A. B. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. Ambiente Construído. Porto Alegre. V.5,n.4. p 47-68, 2005.

NARCISO FILHO, P.A.L., LAMBERTS, R. Avaliação do funcionamento do programa de simulação térmica de ambientes Casamo-Clim. In: Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. São Paulo, 1993.

PEREIRA, Iraci Miranda. Novas Metodologias para Simulação Energética de Edificações: Estudo de Caso. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares do Departamento de Engenharia Nuclear) Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.

PLANO NACIONAL DE ENERGIA. PNE, 2030. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/PNE/Forms/Empreendimento.aspx>>. Acesso em 01 de Junho de 2011.

RAUBER, D. ; SHUCH, L. M. S. ; NARCISO FILHO, P. A. L. ; LAMBERTS, R. Comparação de softwares de análise térmica de edificações: resultados para um projeto padrão e interface programa – usuário. In: Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. São Paulo, 1993.

SANTOS, G. H.; MENDES, N.; PARISE, I. Comparação entre programas de simulação para análise de comportamento térmico de edificações. In: ENCONTRO

NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2004, São Paulo.
Anais... São Paulo: ANTAC, 2004.

THUMANN, A., YOUNGER, W.J. Handbook of energy audits. Fairmont Press - 6th
edition, 2003.

ANEXO A

1- GANHOS TÉRMICOS NO PROTÓTIPO DA MONOZONA SEM JANELA

1.1 DIA ESTÁVEL DE INVERNO (15/07) DA MONOZONA SEM JANELA

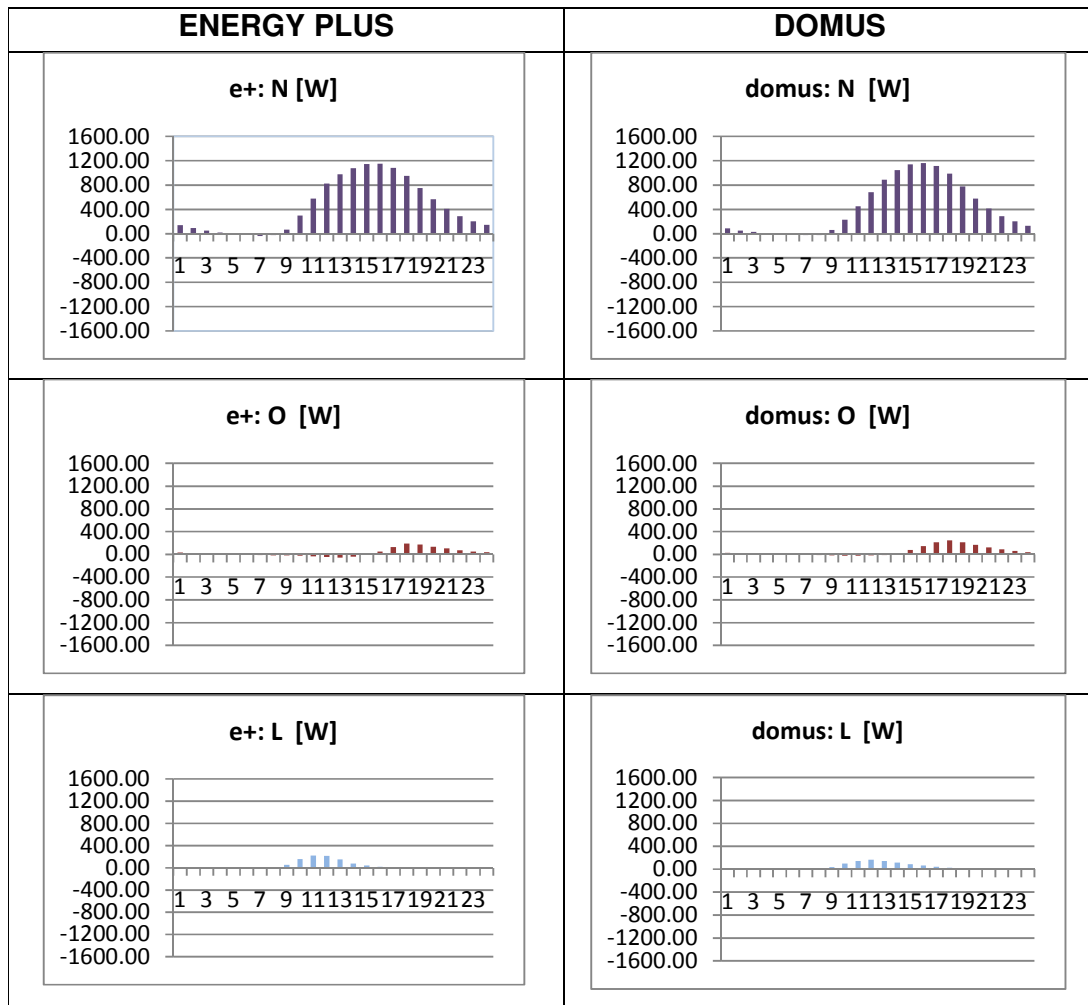


Figura 31: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de monozona sem janelas nas superfícies norte, oeste e leste

1.2 DIA ESTÁVEL DE VERÃO (19/12) DA MONOZONA SEM JANELA

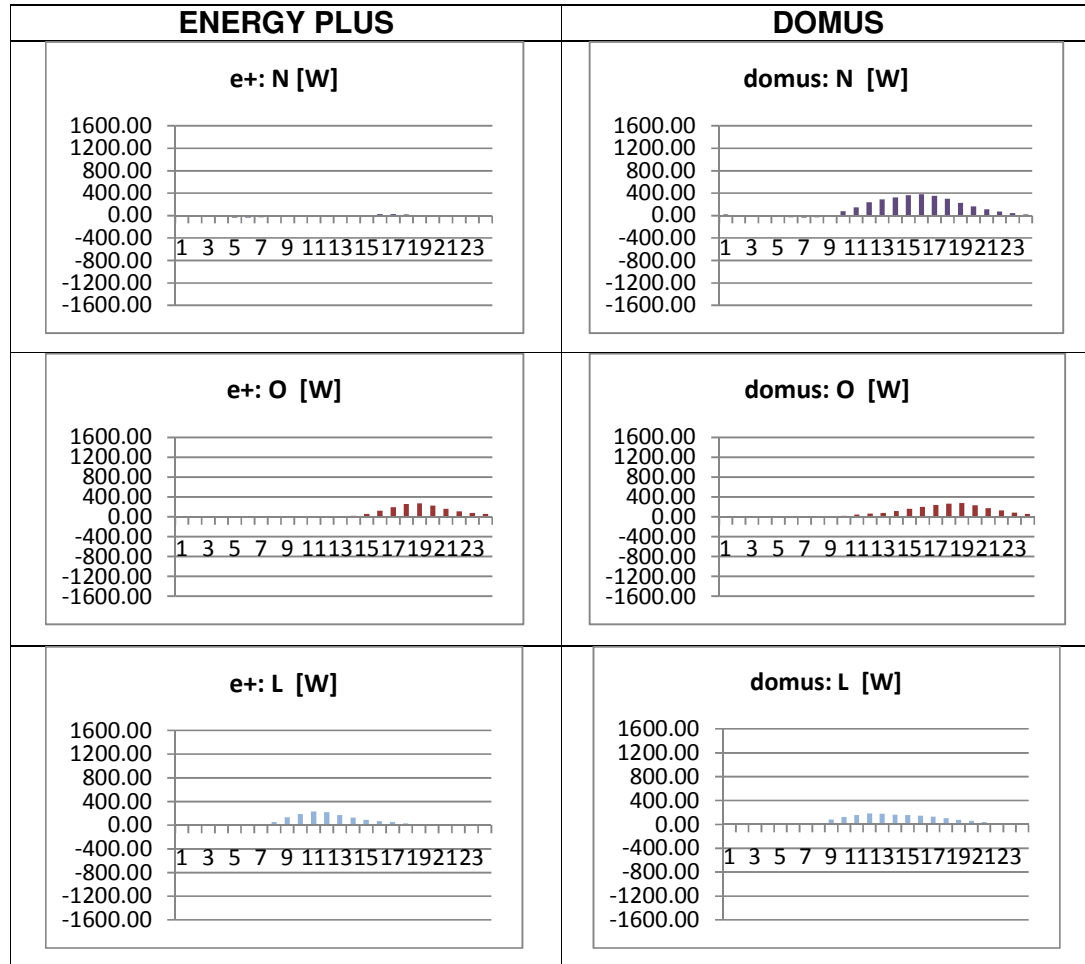


Figura 32: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de monozona sem janelas nas superfícies norte, oeste e leste.

2- GANHOS TÉRMICOS NO PROTÓTIPO DA MONOZONA COM JANELA

2.1 DIA ESTÁVEL DE INVERNO (15/07) DA MONOZONA SEM JANELA

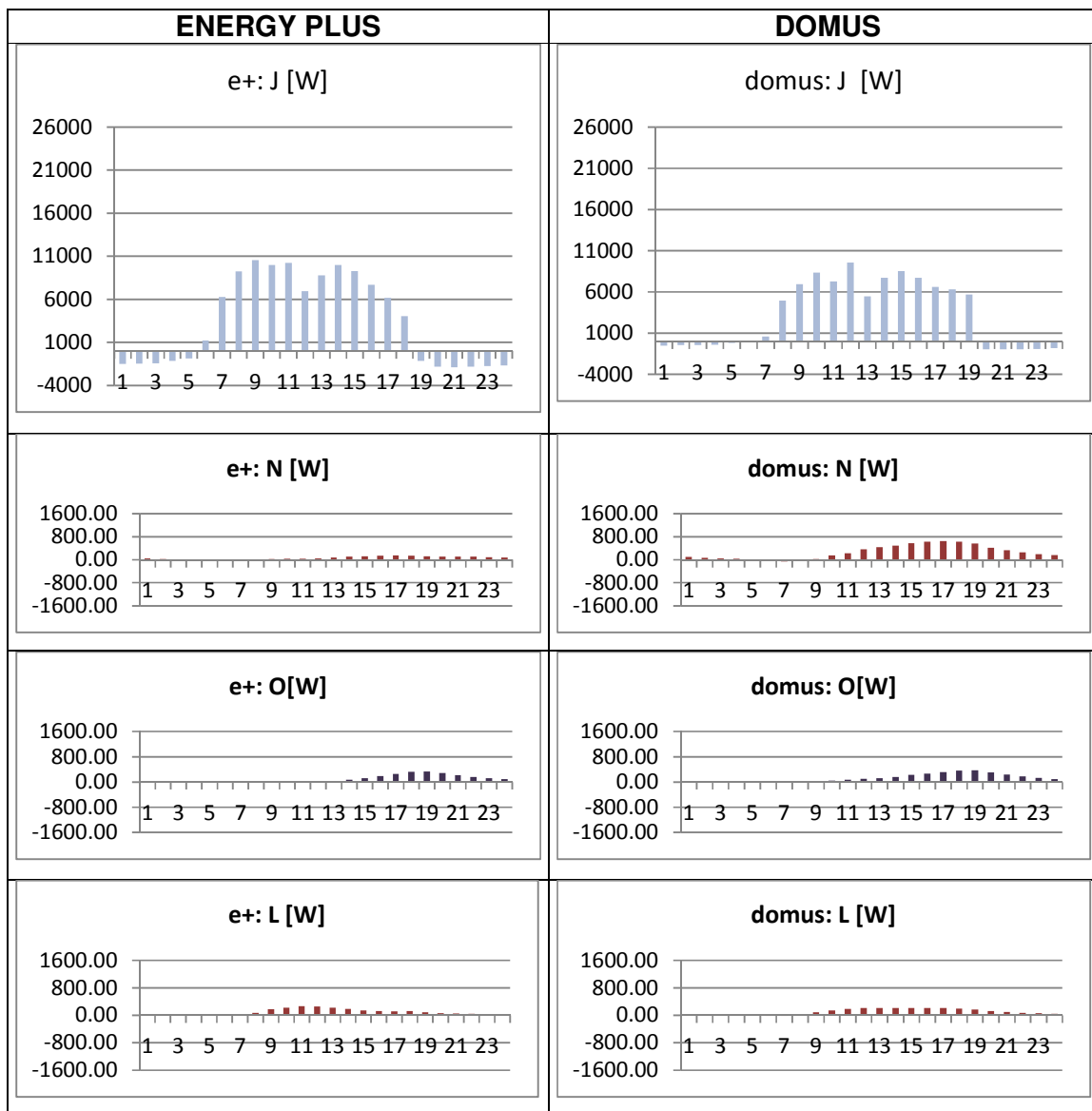


Figura 33: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de monozona com janelas nas superfícies janela, norte, oeste e leste.

2.2 DIA TÍPICO DE INVERNO (15/07) DA MONOZONA COM JANELA

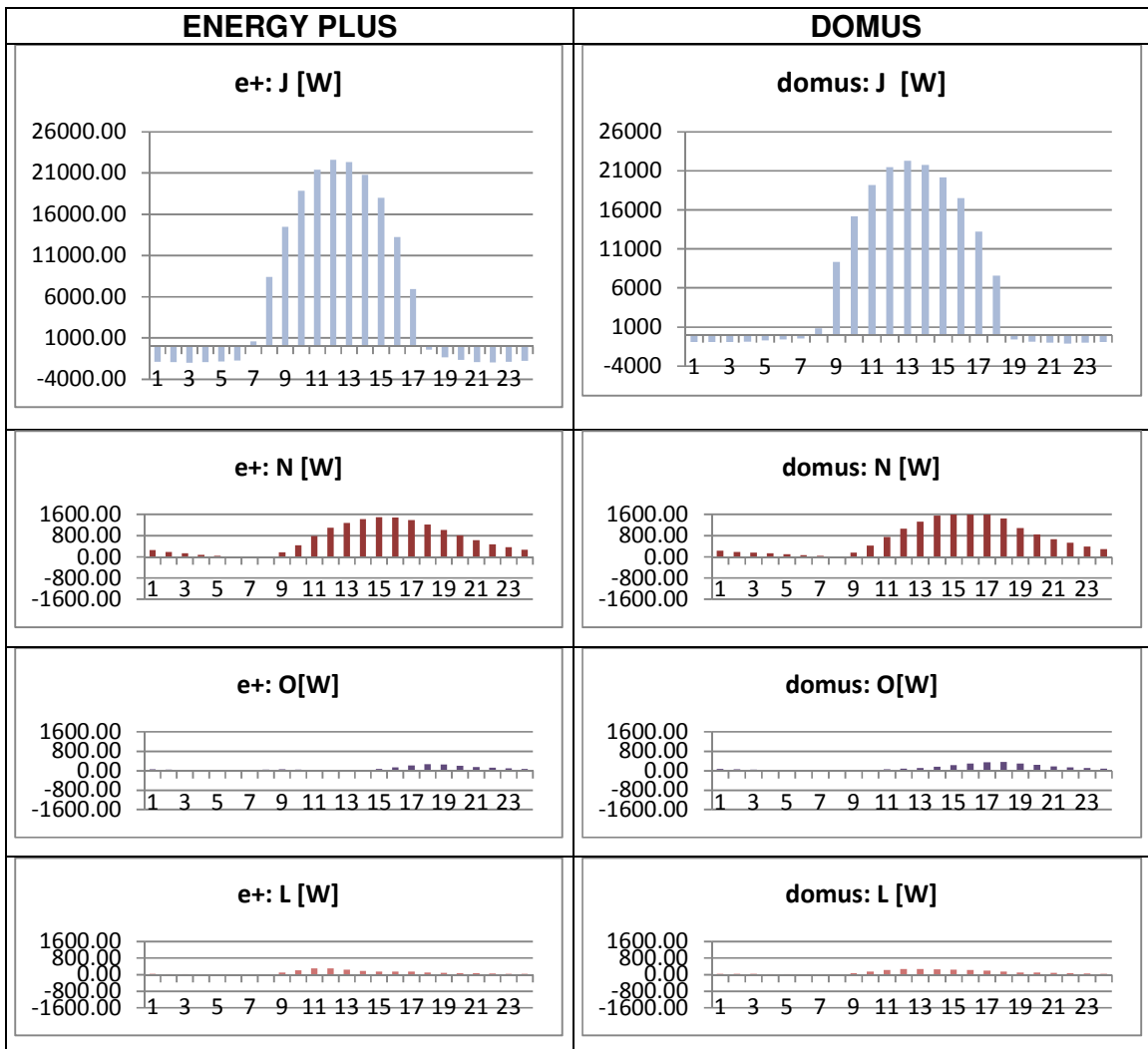


Figura 34: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de monozona com janelas nas superfícies janelas, norte, peste e leste.

3- GANHOS TÉRMICOS NO PROTÓTIPO DA MONOZONA COM JANELA

3.1 DIA ESTÁVEL DE VERÃO (19/12) DA MULTIZONA SEM JANELA

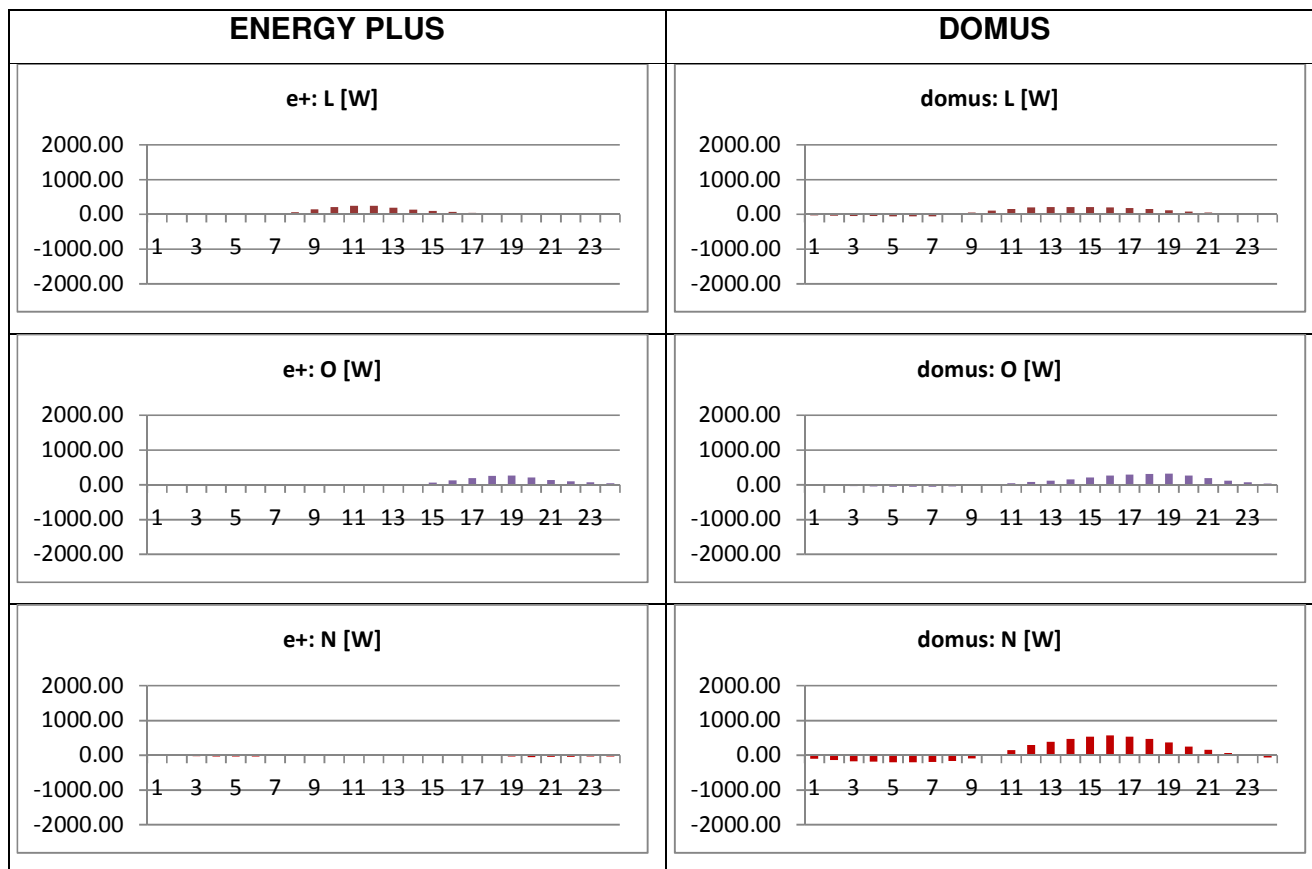


Figura 35: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies leste, oeste e norte no primeiro andar

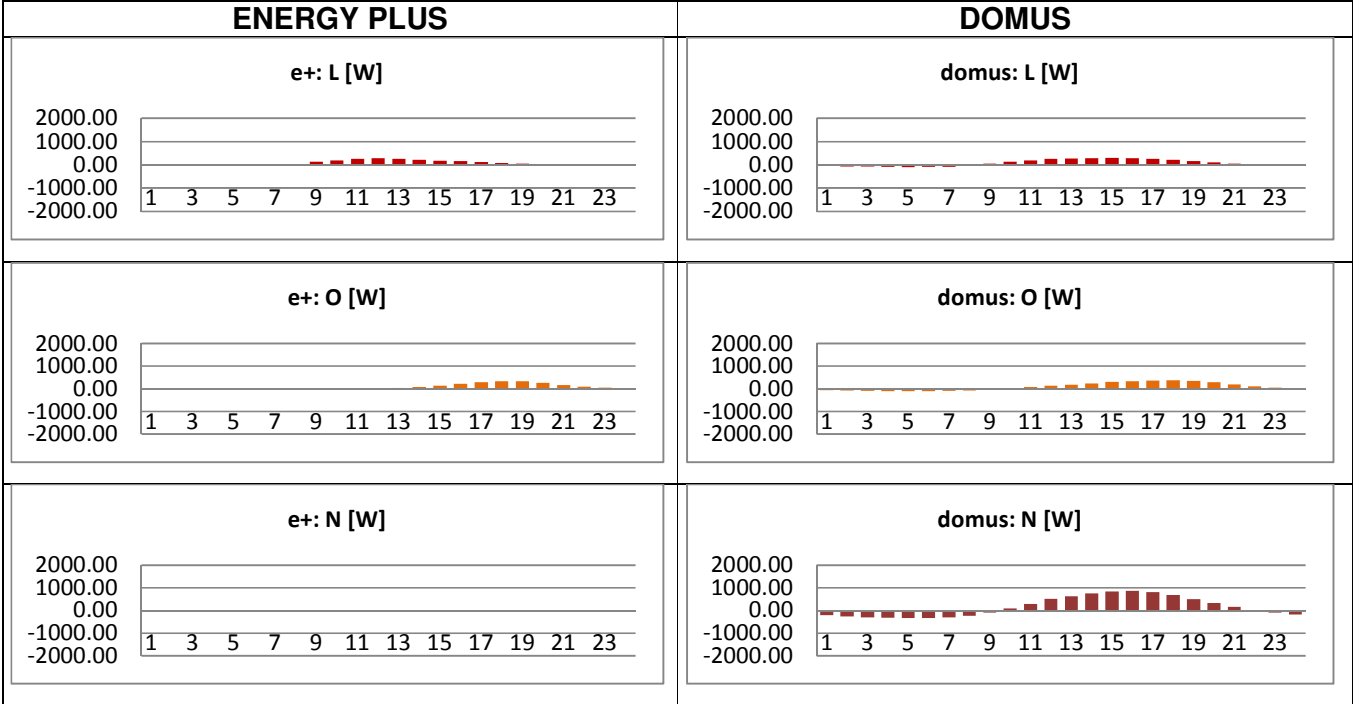


Figura 36: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies leste, oeste e norte no terceiro andar

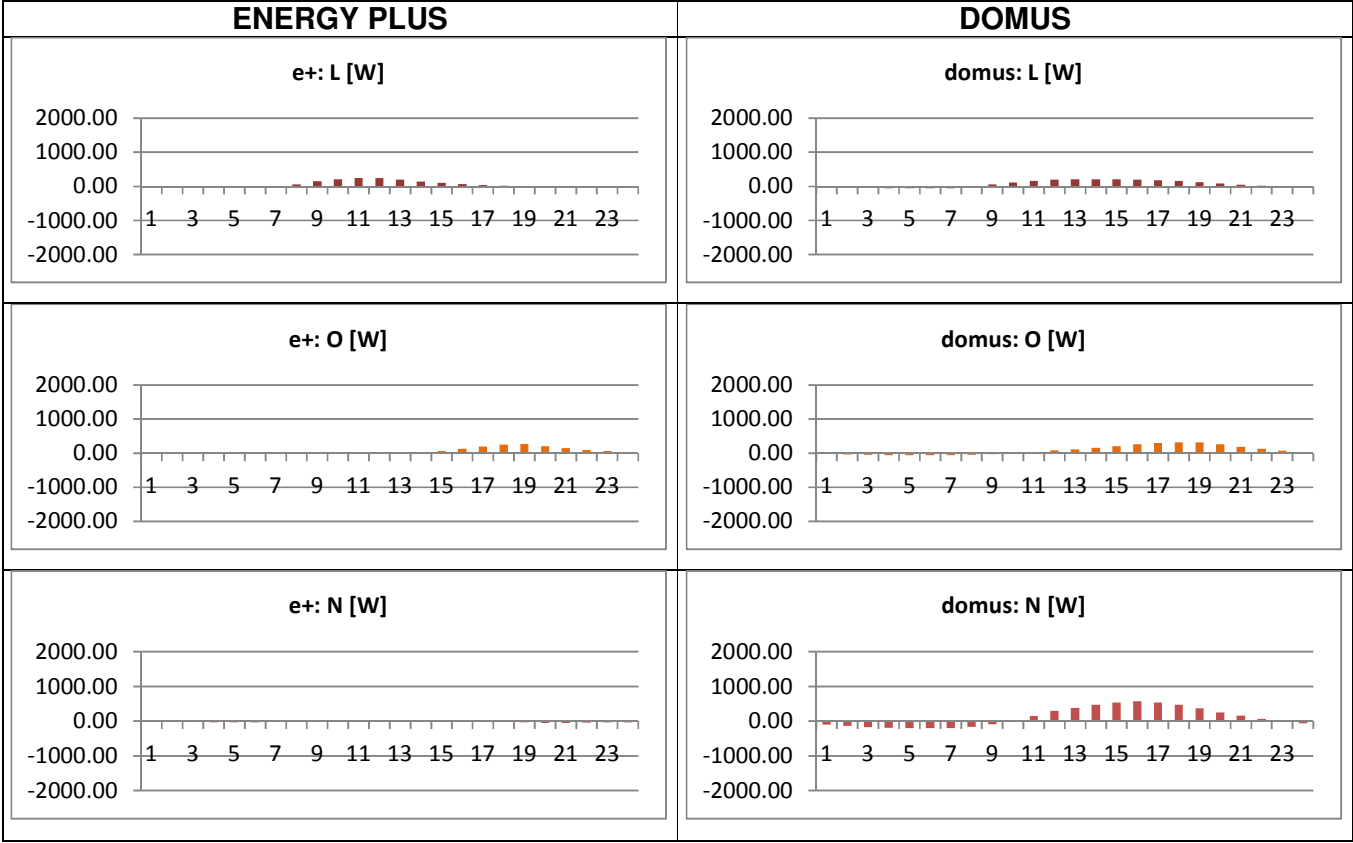


Figura 37: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies leste, oeste e norte no quinto andar

3.2 DIA TÍPICO DE INVERNO (15/07) DA MULTIZONA SEM JANELA

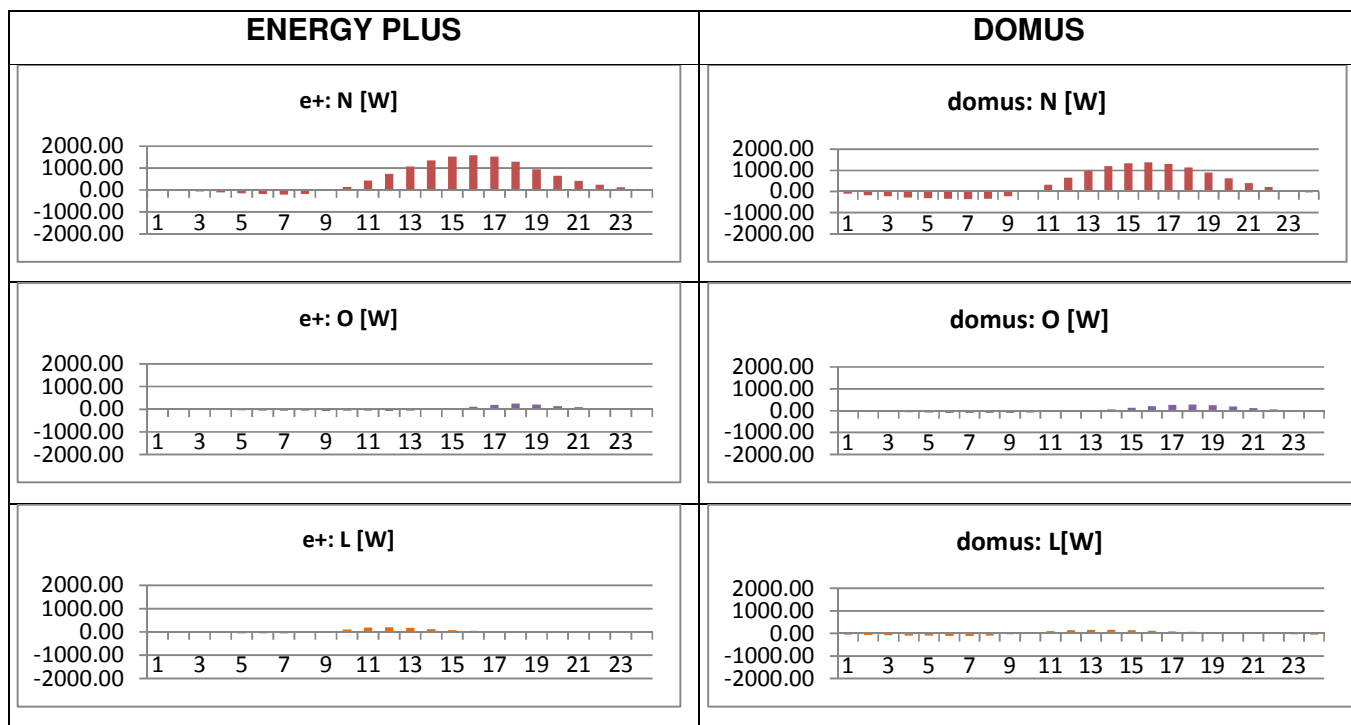


Figura 38: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies norte, oeste e leste no primeiro andar

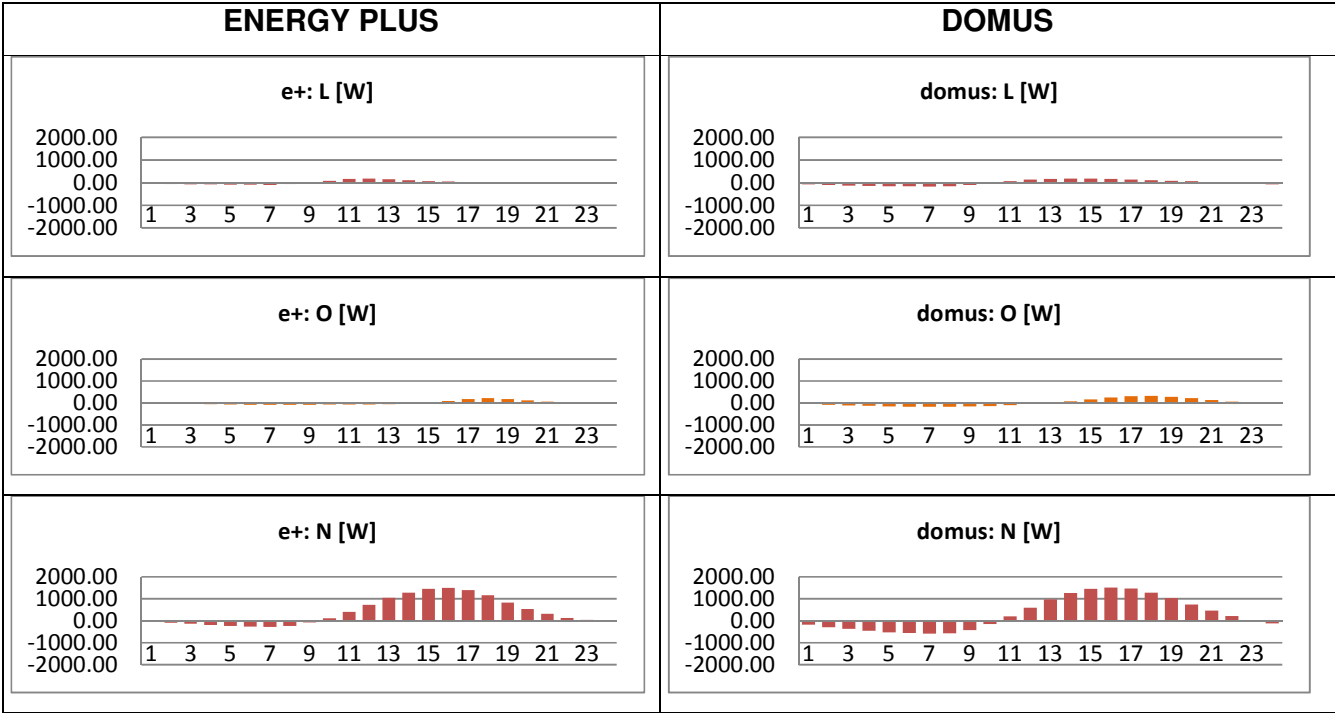


Figura 39: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies leste, oeste e norte no terceiro andar

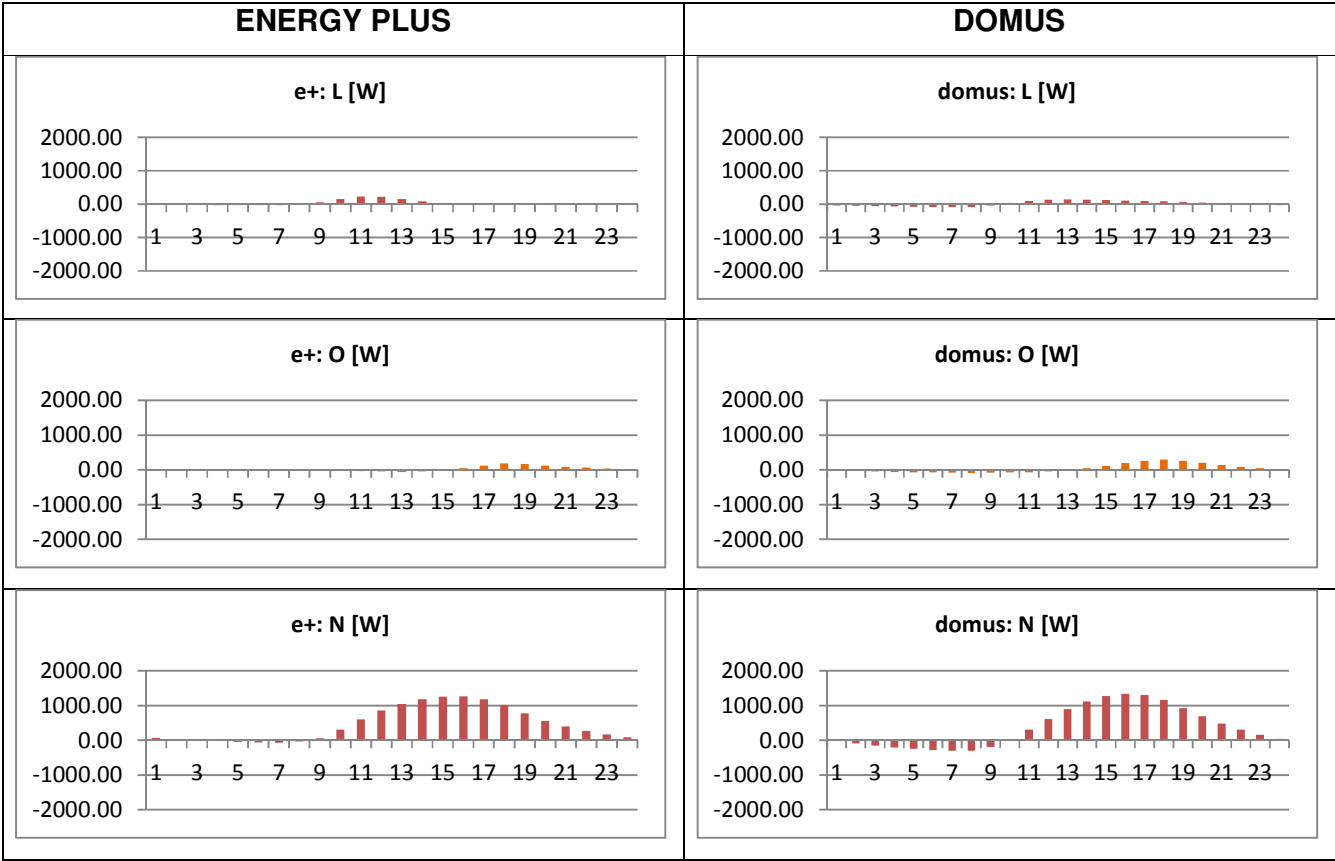


Figura 40: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas sem janelas nas superfícies leste, oeste e norte no quinto andar.

4- GANHOS TÉRMICOS NO PROTÓTIPO DA MONOZONA COM JANELA

4.1 DIA TÍPICO DE VERÃO (19/12) DA MULTIZONA COM JANELA

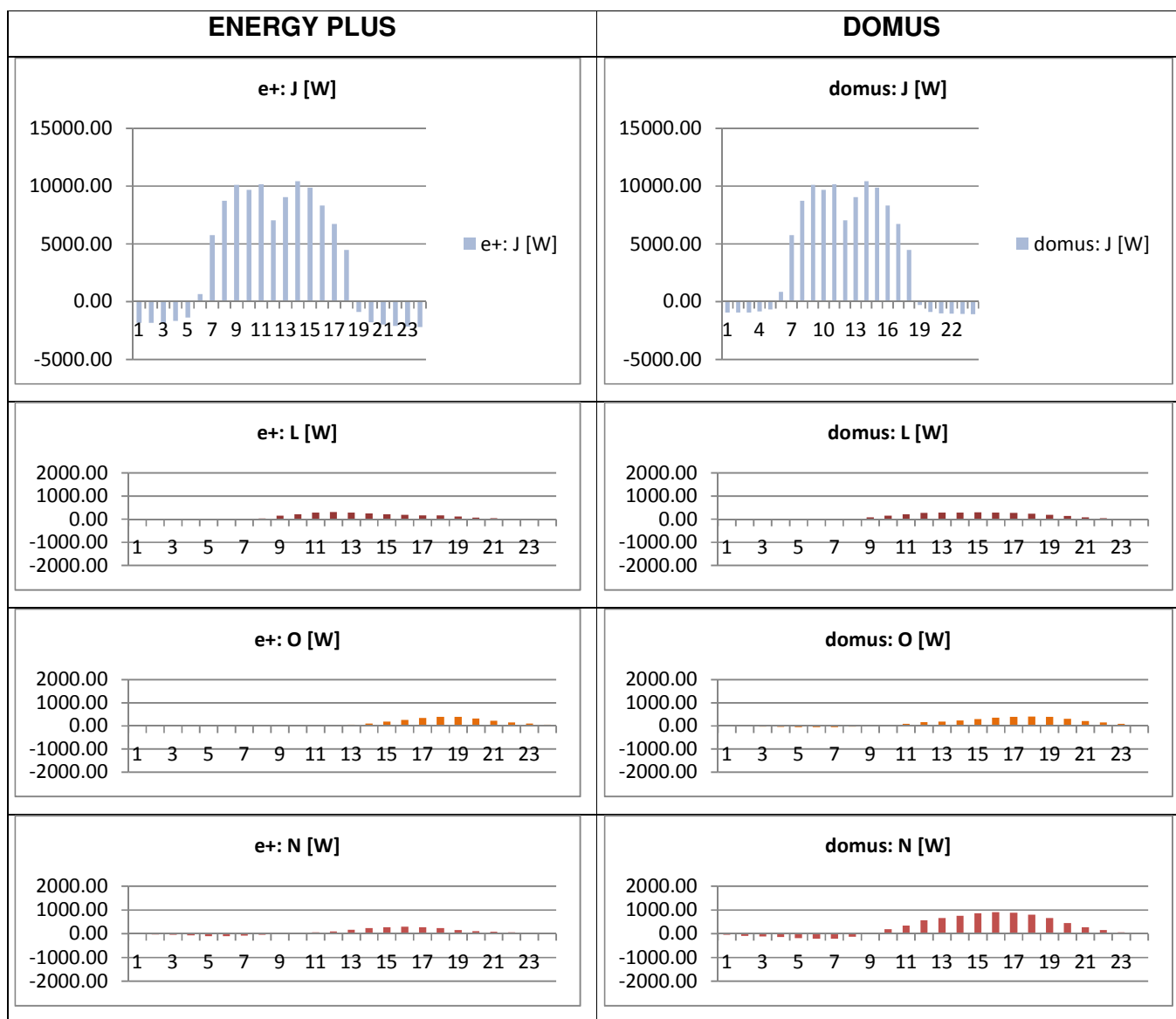


Figura 41: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies janela, leste, oeste e norte no primeiro andar

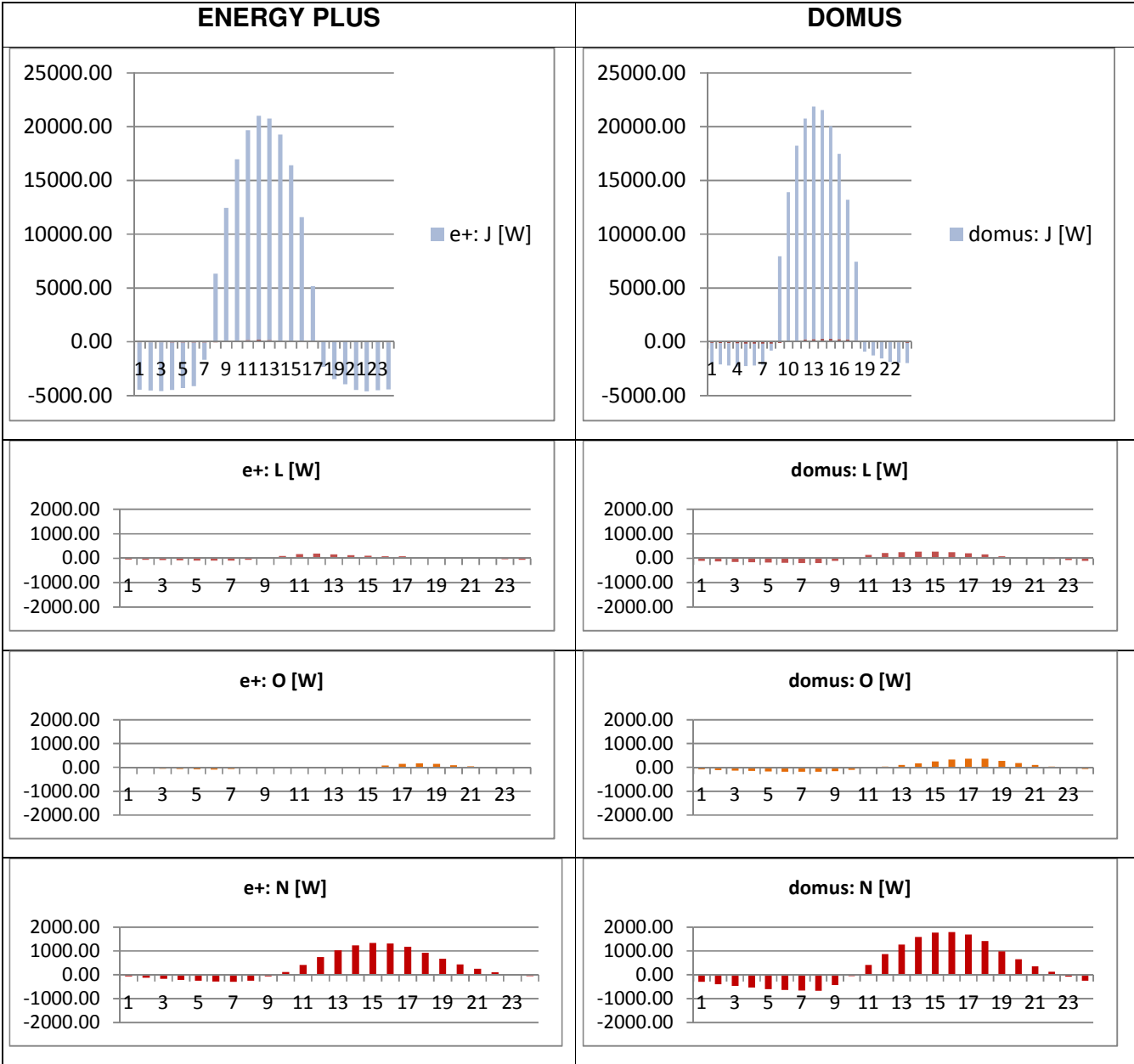


Figura 42: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies leste, oeste e norte no terceiro andar

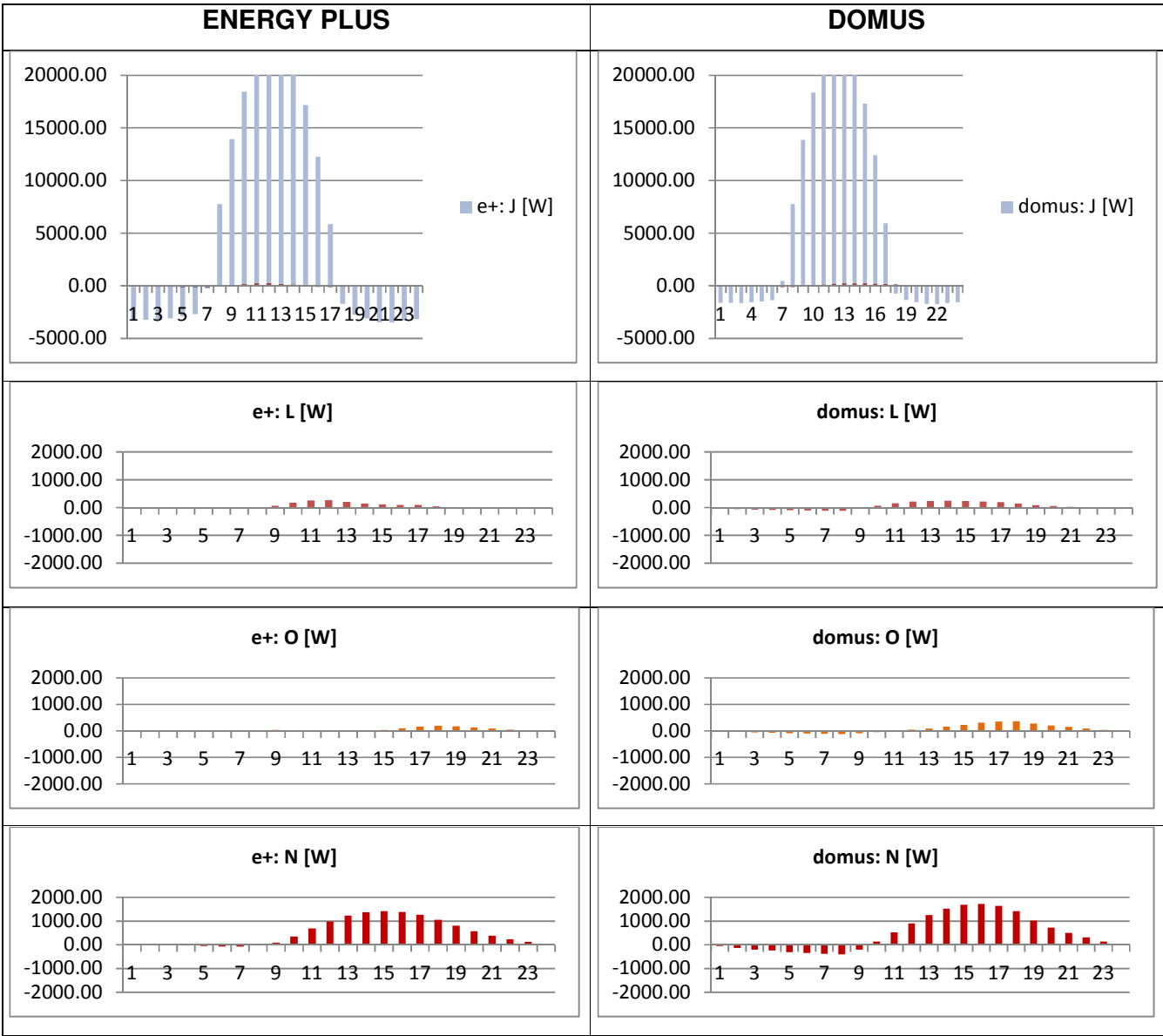


Figura 43: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de verão (19/12) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies leste, oeste e norte no quinto andar

4.2 DIA TÍPICO DE INVERNO (15/07) DA MULTIZONA COM JANELA

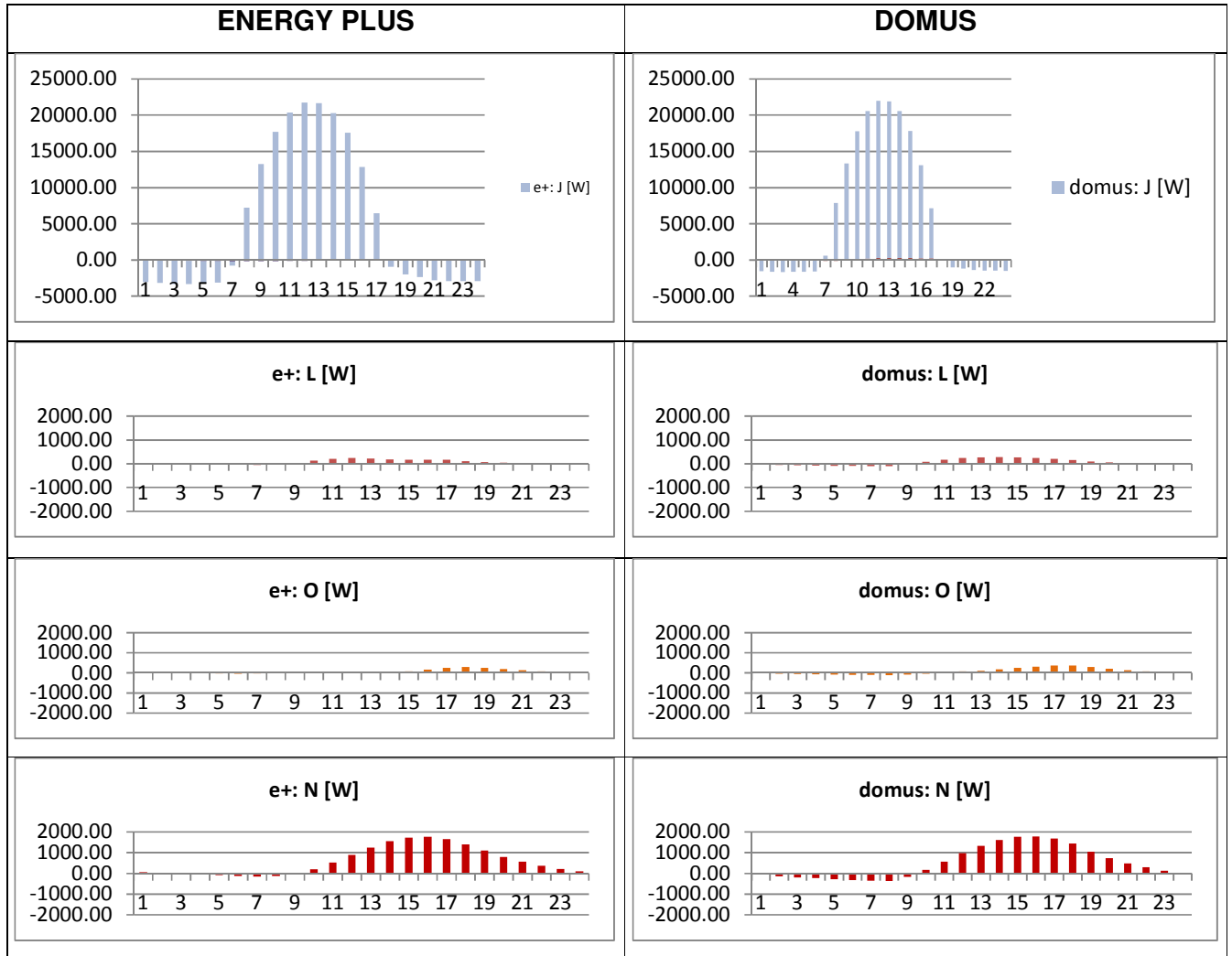


Figura 44: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies janela, leste, oeste e norte no primeiro andar

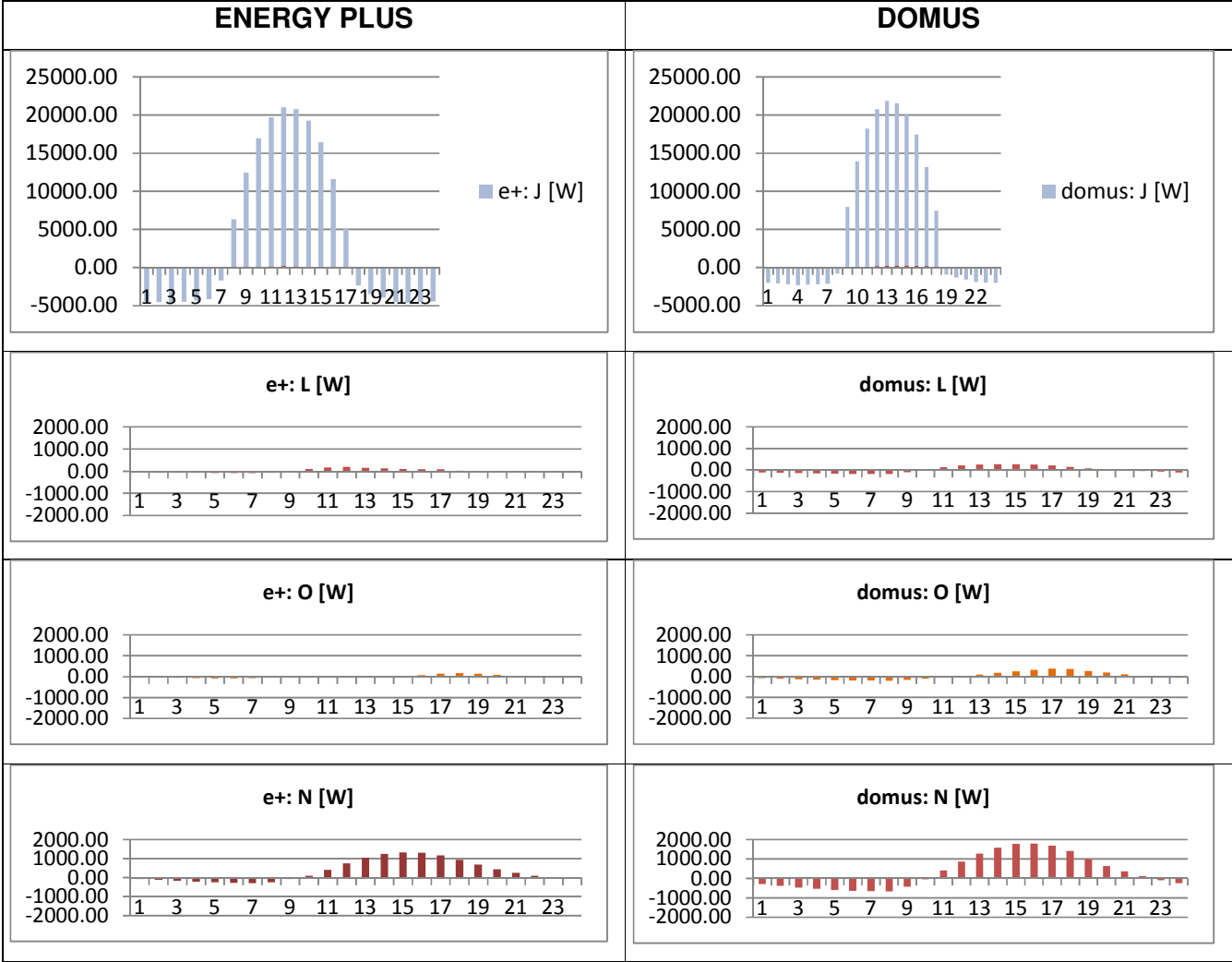


Figura 45: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies janela, leste, oeste e norte no terceiro andar

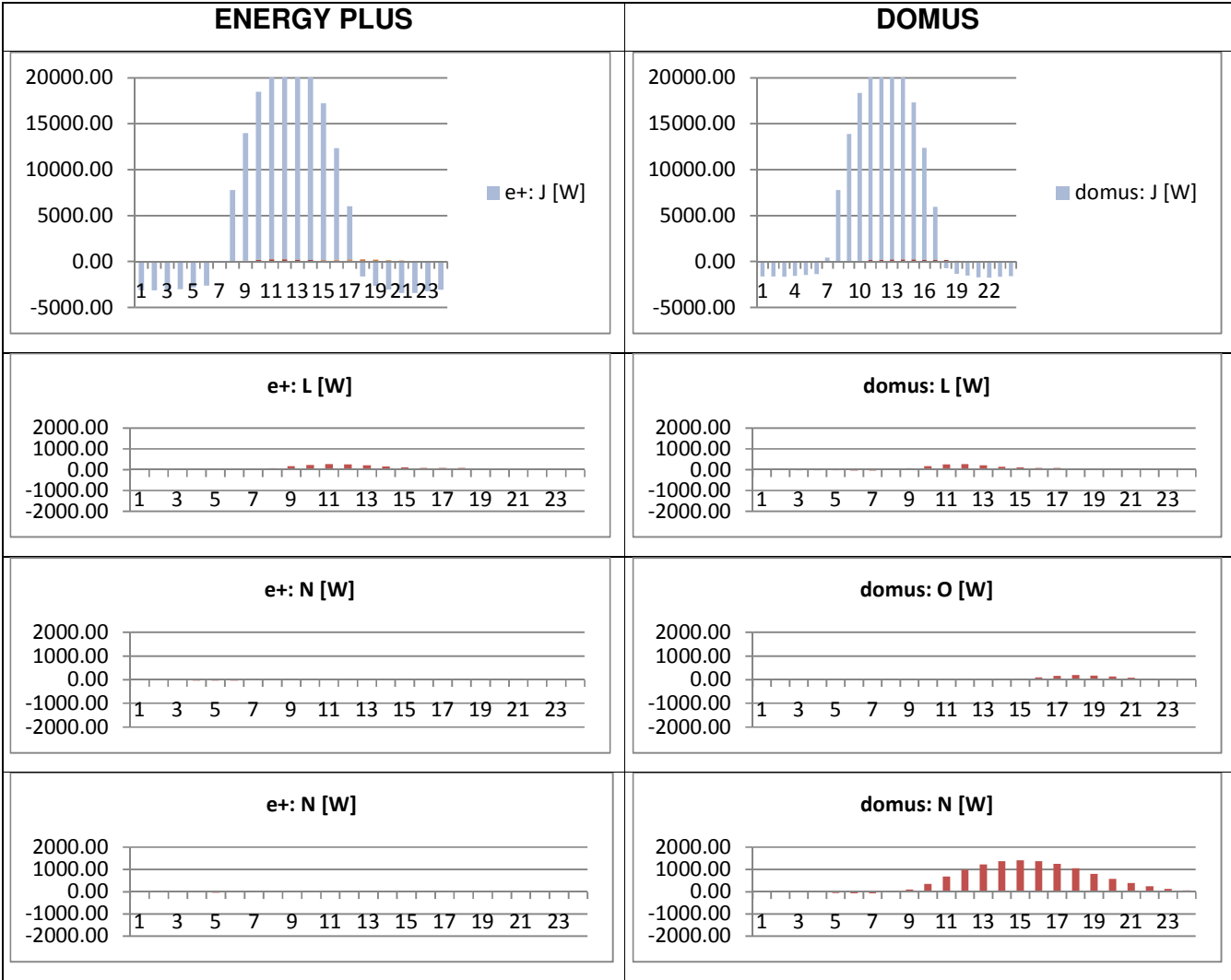


Figura 46: Ganho térmico do Domus e do Energy Plus no dia estável de inverno (15/07) no protótipo de multizonas com janelas nas superfícies janela, leste, oeste e norte no quinto andar

ANEXO B

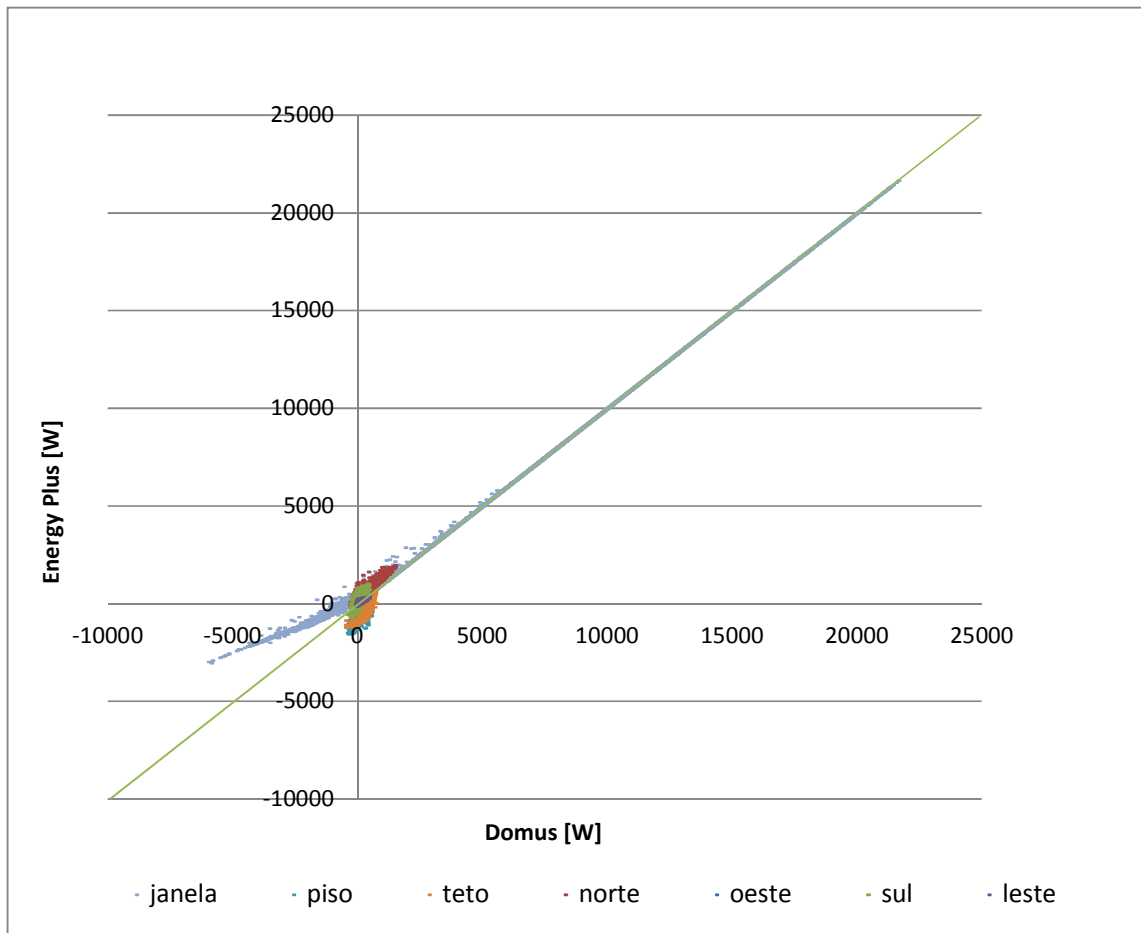


Gráfico 38: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no segundo pavimento no protótipo de multizonas com janelas: todas as superfícies

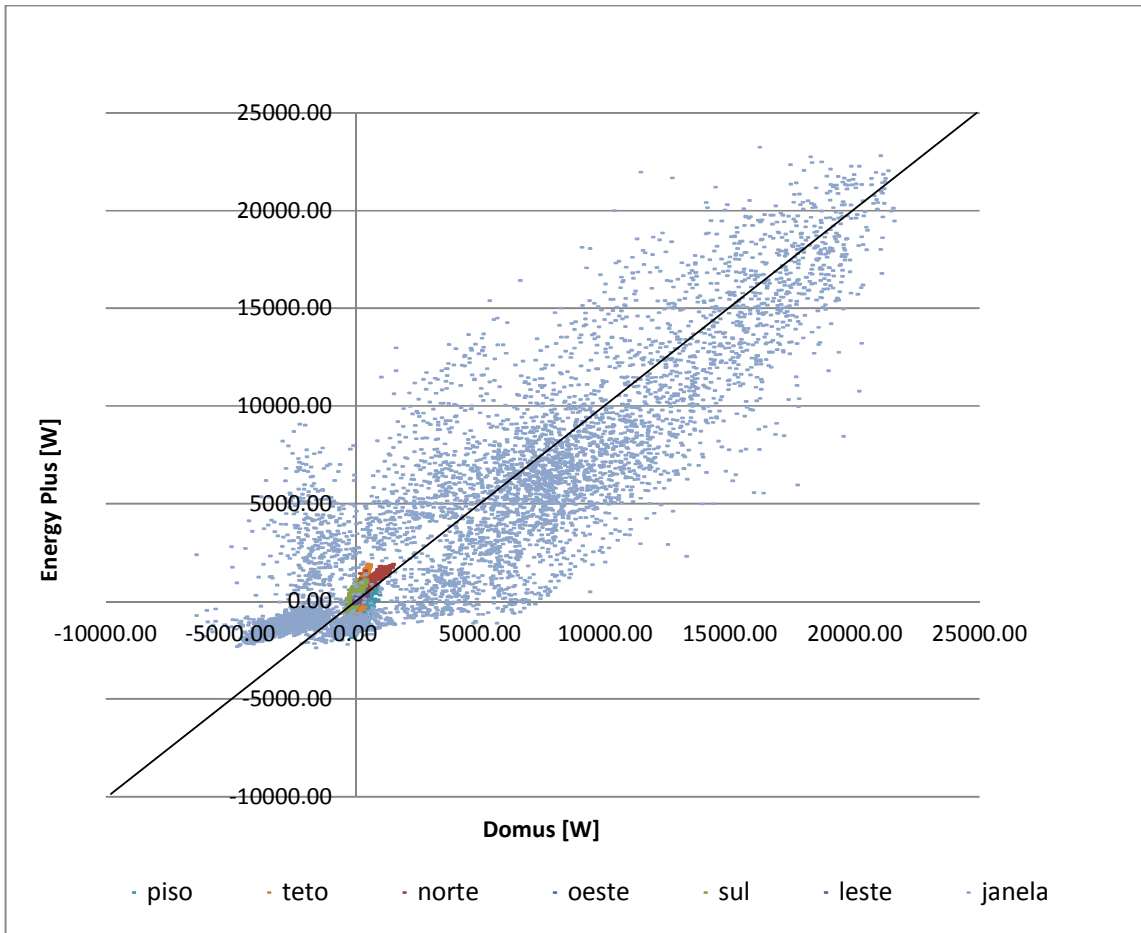


Gráfico 39: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no terceiro pavimento no protótipo de multizonas com janelas: todas as superfícies

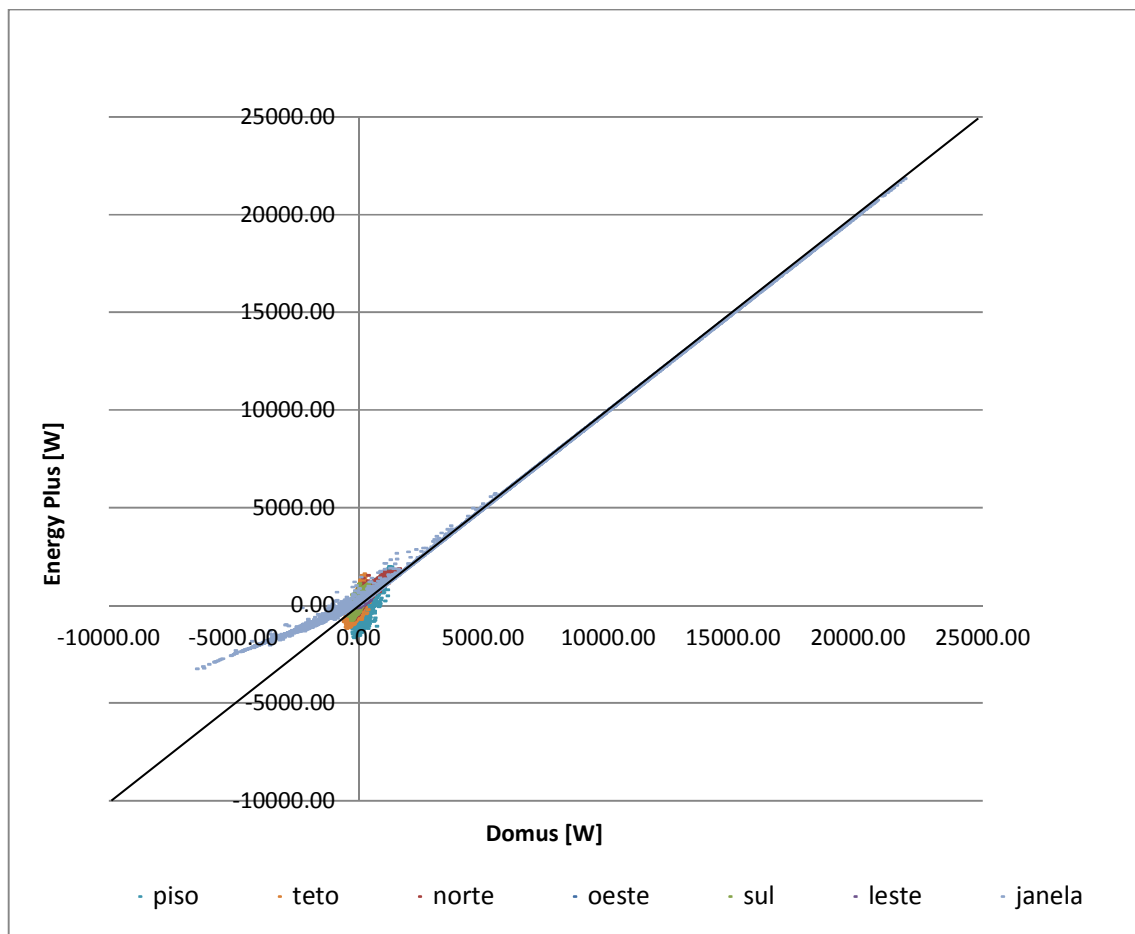


Gráfico 40: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no quarto pavimento no protótipo de multizonas com janelas: todas as superfícies

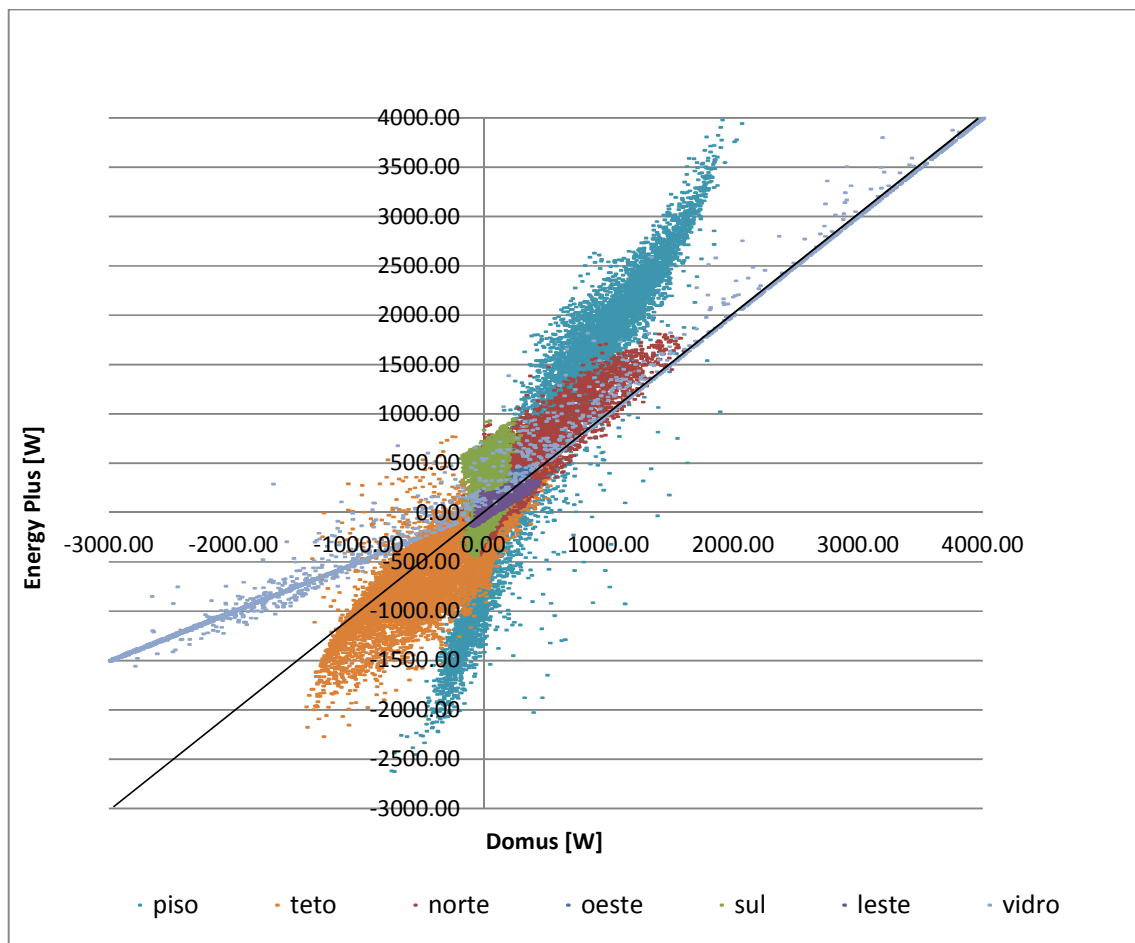


Gráfico 41: Regressão linear dos ganhos térmicos do Domus e do Energy Plus no quinto pavimento no protótipo de multizonas com janelas: todas as superfícies