

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Avaliação do Potencial de Diferentes Períodos de Nebulosidade Durante Eventos de Flexibilidade de Consumo em Edifícios

Alekson Dias da Luz

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
Guilherme Carrilho da Graça

Página em Branco

Agradecimentos

Dedico esta tese aos meus pais, irmãos, tia, minha namorada Jahmila e amigos que sempre me apoiaram dando força e coragem nos momentos mais difíceis.

Um obrigado em especial a minha irmã Romilene Luz e a minha tia Georgina que me acolheram durante todos estes anos na casa delas.

Um especial agradecimento a João Maria Bravo Vieira Dias pelo acompanhamento e colaboração durante a realização deste trabalho. Agradeço também ao Professor Doutor Guilherme Carrilho da Graça.

Agradeço minha namorada Jahmila pelo apoio e pelo companheirismo ao longo de todo este percurso.

Agradeço aos meus colegas, Miguel, Tiago e Sydney pela camaradagem ao longo do meu percurso académico.

Um obrigado a Cynthia e Etalinda pelo apoio ao longo deste percurso.

Uma dedicatória a Cabo Verde e a Portugal, que através do financiamento de uma bolsa e pagamento de propinas me proporcionaram a oportunidade de alargar o meu conhecimento.

Resumo

Desde que o conceito Net Zero Energy Building (NZEB) se tornou uma realidade em 2006, tem sido reforçada a legislação no que toca ao desempenho energético dos edifícios. Assim, segundo a Diretiva 2010/31/EU, relativamente ao desempenho energético dos edifícios, após 2020 todos os novos edifícios terão de ser construídos segundo as normas NZEB's. Para tal, é prioritário ter um balanço de energia anual quase nulo (produção de energia praticamente igual ao consumo de energia). Porém, edifícios que utilizam fontes de energias renováveis (como fotovoltaico, PV) para fazer face à necessidade de energia, poderão consumir mais ou menos energia da rede elétrica dependendo do tipo de clima em que se encontrem inseridos. Para contornar essas variabilidades entre o consumo e a produção de energia, diversos mecanismos de gestão e conservação de energia do edifício tem vindo a ser estudados.

Um dos mecanismos de gestão e conservação de energia quem tem vindo a ser estudado nos últimos anos é a flexibilidade de energia do edifício. Essa flexibilidade é a capacidade do edifício se adaptar às necessidades energéticas da rede elétrica. Para que essa adaptação seja eficiente e possível, é condição que o edifício seja construído de acordo com as características climáticas do local onde está inserido, bem como, a utilização de equipamentos e iluminação elétrica eficientes.

Edifícios com produção local de energia PV, durante períodos de nebulosidade reduz a produção PV, e existe a necessidade de consumir energia da rede elétrica durante estes períodos para manter as condições interiores inalteradas. No entanto, existe a possibilidade de conjugar estes períodos de nebulosidade com períodos de flexibilidade, de forma a reduzir o consumo de energia do edifício sem comprometer o conforto térmico. É esta conjugação que é investigada nesta tese.

Assim, a presente dissertação surge no contexto da necessidade de adoção de estratégias de flexibilidade de energia em edifícios, sem que para tal, o conforto térmico dos ocupantes seja afetado. Para tal, foi identificado e caracterizado períodos de nebulosidade do estado de Oregon, EUA, e três cenários com diferentes massas térmicas internas foram criados. O primeiro cenário representa um escritório com uma massa térmica interna leve, o segundo cenário representa um escritório com uma massa térmica interna típica e o terceiro cenário representa um escritório com uma massa térmica interna pesada. Os resultados obtidos demonstram que é possível utilizar no máximo período de nuvem com um tempo de 60 minutos, 95 minutos, e 135 minutos respetivamente, com uma redução máxima prevista de consumo de energia elétrica dedicado ao AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado) de 16.2 Wh/m², 21.9 Wh/m² e 27.6 Wh/m², respetivamente. A maioria dos períodos de nebulosidade tem uma duração entre 5-20 minutos, portanto a maioria das ocorrências de períodos de nebulosidade durante eventos de flexibilidade podem ser resolvidos a maioria das vezes sem causar desconforto térmico.

Palavras-Chave: Flexibilidade de energia em edifícios; Períodos de nebulosidade; Massa térmica interna; Conforto térmico; Consumo de energia dedicado ao AVAC.

Abstract

Since the Net Zero Energy Building (NZEB) concept became a reality in 2006, legislation regarding the energy performance of buildings has been strengthened. Thus, according to Directive 2010/31/EU, on the energy performance of buildings, after 2020 all new buildings must be built as NZEB's. For this, it is a priority to have almost zero annual energy balance (energy production almost equal to energy consumption). However, buildings that use energy sources such as PV, may consume more or less energy from the electricity grid, depending on the climate they are located. To circumvent these variabilities between energy consumption and production, several energy management and conservations mechanisms in the building have been studied.

One of the energy management and conservation mechanisms that has been studied in recent years, is the energy flexibility of the building, this flexibility is the building's ability to adapt to the energy needs of the power grid. For this, it is a condition that building is constructed according to the climatic characteristics of the place where it is located, as well as the use of efficient equipment and lighting.

Buildings with local PV energy production, during periods of cloudiness, reduce PV production, and there is a need to consume energy from the electricity grid during these periods to keep indoor conditions unchanged. However, there is the possibility of combining these periods of cloudiness with periods of flexibility, in order to reduce the building's energy consumption without compromising thermal comfort. It is this conjugation that is investigated in this thesis.

Thus, this thesis arises in the context of the need to adopt strategies for flexibility of energy consumption in buildings, without affecting the thermal comfort of the occupants. For this purpose, periods of cloudiness of the state of Oregon, USA, were identified and characterized, and three scenarios with different internal thermal masses were created. The first scenario represents a light office configuration with a light internal thermal mass, the second scenario represents a typical office configuration, and the third scenario represents a heavy mass office configuration with a heavy internal thermal mass. The results obtained demonstrate that it is possible to use a maximum period of cloud with a time of 60 minutes, 95 minutes, and 135 minutes respectively, with a maximum expected reduction in energy consumption dedicated to HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) of 16.2 Wh/m², 21.9 Wh/m² and 27.6 Wh/m², respectively. Most cloudiness periods last between 5-20 minutes, so most cloudiness events during flexibility events can be resolved most of time without causing thermal discomfort.

Key words: Building's energy flexibility; Cloudiness periods; Internal thermal mass; Thermal comfort; Energy consumption dedicated to HVAC.

Índice

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Índice de Figuras	vii
Índice de Figuras Anexo A	viii
Índice de Figuras Anexo B	viii
Índice de Figuras Anexo C	ix
Índice de Tabelas	x
Siglas e Acrónimos	xi
Simbologia e Notações	xii
Capítulo I – Introdução	14
1.1. Motivação	14
1.2. Objetivos	14
1.3. Estrutura da Dissertação	15
Capítulo II – Estado da Arte	17
2.1. Variabilidade da Nebulosidade	17
2.1.1. Tipos de Nuvens e sua Classificação	17
2.1.2. Métodos Utilizados na Detecção e Classificação das Condições do Céu	17
2.2. NZEB's Definição	19
2.3. Flexibilidade de Energia do Edifício.	19
Capítulo III – Metodologia: Identificação de Períodos de Nebulosidade	23
3.1. Análise e Recolha de Dados	23
3.2. Método Utilizado na Identificação de Períodos de Nebulosidade	23
3.2.1. Declinação Solar	23
3.2.2. Equação do Tempo	24
3.2.3. Fator de Correção do Tempo	24
3.2.4. Ângulo Horário	24
3.2.5. Ângulo Zenital	24
3.2.6. Radiação Horizontal Extraterrestre	25
3.2.7. Identificação de Períodos de Nebulosidade	25
Capítulo IV – Caso de Estudo	28
4.1. Simulação Dinâmica	28
4.1.1. Balanço Térmico	29
4.1.2. Ganhos Internos	29

4.2. Modelo de Simulação do Edifício -----	30
4.2.1. Zonas Térmicas -----	30
4.2.2. Sistema AVAC -----	30
4.2.3. Massa Térmica Interna do Edifício -----	31
4.2.4. Simulação de Eventos de Flexibilidade -----	33
Capítulo V - Resultados -----	36
5.1. Caracterização de Períodos Nebulosidade-----	36
5.2. Avaliação do Consumo de Energia e Conforto Térmico-----	39
5.2.1. Ganho Interno e Ganho Solar -----	39
5.2.2. Cenário 1 - Escritório com uma massa térmica interna leve -----	39
5.2.3. Cenário 2 - Escritório com uma massa térmica interna típica.-----	42
5.2.4. Cenário 3 - Escritório com uma massa térmica interna pesada. -----	45
5.2.5. Comparação dos Cenários -----	48
Capítulo VI - Conclusão-----	52
Referências Bibliográficas -----	54
Anexos -----	58
Anexo A – Cenário 1 Figuras -----	58
Anexo B - Cenário 2 Figuras -----	71
Anexo C – Cenário 3 Figuras -----	84

Índice de Figuras

Figura 1: Exemplo das condições do céu	26
Figura 2: Localização geográfica Oregon [31].....	28
Figura 3: Modelo geométrico do Califórnia Office introduzido no EnergyPlus	30
Figura 4: Duas abordagens de representar a massa térmica interna no EnergyPlus [43].	33
Figura 5: Controlo AVAC para um evento de flexibilidade	34
Figura 6: Caraterização da condição do céu em Oregon.....	36
Figura 7: Caraterização dos períodos de nebulosidade em função de Tmax diário.	37
Figura 8: Duração dos períodos de nebulosidade em função de Tmax diária.	38
Figura 9: Ordem de grandeza do ganho interno relativamente ao ganho solar	39
Figura 10: Simulação dinâmica de um evento flexibilidade dia 15 de agosto, cenário 1.....	40
Figura 11: Redução consumo de energia e variação média da temperatura interior, massa térmica interna leve	41
Figura 12: Previsão da redução do consumo de energia e variação media da temperatura interior, massa térmica interna leve	42
Figura 13: Simulação dinâmica de um evento flexibilidade dia 15 de agosto, cenário 2.....	42
Figura 14: Redução consumo de energia e variação média da temperatura interior, massa térmica interna de um escritório típico.....	44
Figura 15: Previsão da redução do consumo de energia e variação media da temperatura interior, massa térmica interna de escritório típico	45
Figura 16: Simulação dinâmica de um evento flexibilidade dia 15 de agosto, cenário 3.....	45
Figura 17: Redução consumo de energia e variação média da temperatura interior, massa térmica interna pesada.	47
Figura 18: Previsão da redução do consumo de energia e variação media da temperatura interior, massa térmica interna pesada.....	48
Figura 19: Variação da temperatura média interior nos três cenários em função da temperatura exterior	48
Figura 20: Impacto da massa térmica interna dos 3 cenários, zona sul dia 15 de agosto.....	49
Figura 21: Comparação dos cenários - período de nuvem máximo e redução do consumo de energia máxima prevista.	50

Índice de Figuras Anexo A

Figura A. 1: Simulação dinâmica dia 2 de julho	58
Figura A. 2: Simulação dinâmica dia 4 de outubro	58
Figura A. 3: Simulação dinâmica dia 6 de junho	59
Figura A. 4: Simulação dinâmica dia 7 de abril	59
Figura A. 5: Simulação dinâmica dia 7 de junho	60
Figura A. 6: Simulação dinâmica dia 10 de maio	60
Figura A. 7: Simulação dinâmica dia 11 de setembro	61
Figura A. 8: Simulação dinâmica dia 13 de setembro	61
Figura A. 9: Simulação dinâmica dia 15 de agosto	62
Figura A. 10: Simulação dinâmica dia 15 de setembro	62
Figura A. 11: Simulação dinâmica dia 16 de julho	63
Figura A. 12: Simulação dinâmica dia 17 de maio	63
Figura A. 13: Simulação dinâmica dia 18 de setembro	64
Figura A. 14: Simulação dinâmica dia 19 de setembro	64
Figura A. 15: Simulação dinâmica dia 20 de abril	65
Figura A. 16: Simulação dinâmica dia 20 de maio	65
Figura A. 17: Simulação dinâmica dia 20 de setembro	66
Figura A. 18: Simulação dinâmica dia 21 março	66
Figura A. 19: Simulação dinâmica dia 21 de maio	67
Figura A. 20: Simulação dinâmica dia 24 de setembro	67
Figura A. 21: Simulação dinâmica dia 25 de junho	68
Figura A. 22: Simulação dinâmica dia 27 de abril	68
Figura A. 23: Simulação dinâmica dia 27 de junho	69
Figura A. 24: Simulação dinâmica dia 27 de março	69
Figura A. 25: Simulação dinâmica dia 28 de setembro	70

Índice de Figuras Anexo B

Figura B. 1: Simulação dinâmica dia 2 de julho	71
Figura B. 2: Simulação dinâmica dia 4 de outubro	71
Figura B. 3: Simulação dinâmica dia 6 de junho	72
Figura B. 4: Simulação dinâmica dia 7 de abril	72
Figura B. 5: Simulação dinâmica dia 7 de junho	73
Figura B. 6: Simulação dinâmica dia 10 de maio	73
Figura B. 7: Simulação dinâmica dia 11 de setembro	74
Figura B. 8: Simulação dinâmica dia 13 de setembro	74

Figura B. 9:Simulação dinâmica dia 15 de agosto	75
Figura B. 10:Simulação dinâmica dia 15 de setembro	75
Figura B. 11:Simulação dinâmica dia 16 de julho	76
Figura B. 12:Simulação dinâmica dia 17 de maio.....	76
Figura B. 13:Simulação dinâmica dia 18 de setembro	77
Figura B. 14:Simulação dinâmica dia 19 de setembro	77
Figura B. 15:Simulação dinâmica dia 20 de maio.....	78
Figura B. 16:Simulação dinâmica dia 20 de setembro	78
Figura B. 17:Simulação dinâmica dia 20 de abril	79
Figura B. 18:Simulação dinâmica dia 21 de março.....	79
Figura B. 19:Simulação dinâmica dia 21 de maio.....	80
Figura B. 20:Simulação dinâmica dia 24 de setembro	80
Figura B. 21:Simulação dinâmica dia 25 de junho.....	81
Figura B. 22:Simulação dinâmica dia 27 de abril	81
Figura B. 23:Simulação dinâmica dia 27 de junho.....	82
Figura B. 24:Simulação dinâmica dia 27 de março.....	82
Figura B. 25:Simulação dinâmica dia 28 de setembro	83

Índice de Figuras Anexo C

Figura C. 1:Simulação dinâmica dia 2 de julho	84
Figura C. 2:Simulação dinâmica dia 4 de outubro	84
Figura C. 3:Simulação dinâmica dia 6 de junho.....	85
Figura C. 4:Simulação dinâmica dia 7 de abril	85
Figura C. 5:Simulação dinâmica dia 7 de junho.....	86
Figura C. 6:Simulação dinâmica dia 10 de maio.....	86
Figura C. 7:Simulação dinâmica dia 11 de setembro	87
Figura C. 8:Simulação dinâmica dia 13 de setembro	87
Figura C. 9:Simulação dinâmica dia 15 de agosto	88
Figura C. 10:Simulação dinâmica dia 15 de setembro	88
Figura C. 11:Simulação dinâmica dia 16 de julho	89
Figura C. 12:Simulação dinâmica dia 17 de maio.....	89
Figura C. 13:Simulação dinâmica dia 18 de setembro	90
Figura C. 14:Simulação dinâmica dia 19 de setembro	90
Figura C. 15:Simulação dinâmica dia 20 de abril	91
Figura C. 16:Simulação dinâmica dia 20 de maio.....	91
Figura C. 17:Simulação dinâmica dia 20 de setembro	92

Figura C. 18:Simulação dinâmica dia 21 de março.....	92
Figura C. 19:Simulação dinâmica dia 21 de maio.....	93
Figura C. 20:Simulação dinâmica dia 24 de setembro	93
Figura C. 21:Simulação dinâmica dia 25 de junho.....	94
Figura C. 22:Simulação dinâmica dia 27 de abril	94
Figura C. 23:Simulação dinâmica dia 27 de junho.....	95
Figura C. 24:Simulação dinâmica dia 27 de abril	95
Figura C. 25:Simulação dinâmica dia 28 de setembro	96

Índice de Tabelas

Tabela 1:Carga interna de cada zona.....	29
Tabela 2:Características termofísicas e área superficial da massa interna original do edifício.....	32
Tabela 3:Temperatura simulada com “ZoneCapacitanceMultiplier:ResearchSpecial” e temperatura simulada com Internal Mass.....	32
Tabela 4:Resultados simulação escritório massa térmica interna leve.....	40
Tabela 5:Resultados simulação escritório massa térmica interna de um escritório típico	43
Tabela 6:Resultados simulação escritório com uma massa térmica interna pesada.....	46

Siglas e Acrónimos

AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado
IEA	Agência Internacional de Energia
DR	<i>Demand Response</i>
DSM	<i>Demand Side Management</i>
EPBD	<i>Energy Performance in Buildings Directive</i>
PV	Fotovoltaico
NZEB	<i>Net Zero Energy Building</i>
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
UTAN	Unidade de Tratamento de Ar Novo

Simbologia e Notações

ω	Ângulo horário [°]
θ_z	Ângulo zenital [°]
COP_{aq} e COP_{arr}	Coefficiente de Performance da bomba de calor em modo aquecimento e em modo arrefecimento, respetivamente [-]
G_{sc}	Constante Solar [W/m^2]
δ	Declinação solar [°]
ET	Equação do tempo [horas]
TC	Fator de correção do tempo [horas]
RH	Humidade relativa [%]
K_T	Índice de Claridade [-]
DHI	Irradiação horizontal difusa [W/m^2]
GHI	Irradiação horizontal global [W/m^2]
GHI_{extra}	Irradiação horizontal global extraterrestre [W/m^2]
DNI	Irradiação solar direta [W/m^2]
λ_{SMT}	Longitude do meridiano de referência [°]
λ_{LOC}	Longitude local [°]
\bar{T}_{out}	Média da temperatura exterior [°C]
T_{dew}	Temperatura do ponto de orvalho [°C]
T_{out}	Temperatura exterior [°C]
T_{max}	Temperatura máxima [°C]
LST	Tempo solar local [horas]
$\overline{\Delta T}_{in}$	Variação média da temperatura interior [°C]
$\bar{t}_{pos\ nuvem}$	Variação média do tempo que a temperatura interior volta aos 22°C [minutos]

Capítulo I – Introdução

1.1. Motivação

O edifício tem um papel importante no consumo de energia, tal que, é possível reduzir a quantidade de energia requerida num edifício se estes forem adequadamente projetados e construídos. Com a demanda crescente das necessidades energéticas e da necessidade de reduzir as emissões de CO₂, tem exigido enormes esforços na investigação e desenvolvimento de novas tecnologias baseado em políticas de construção sustentáveis focados na conservação de energia.

Assim, na última década, precisamente no ano de 2006, o conceito *Net Zero Energy Building* (NZEB) tornou-se uma realidade, e considerado desde logo como uma solução para mitigar os impactos negativos do consumo de energia dos futuros edifícios [1]. Desta maneira, todos os edifícios construídos na U.E, segundo a Diretiva Para o Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD)¹ 2010/31/EU do parlamento europeu e do conselho de 19 de maio de 2010 [2], após 2020 devem ser NZEB's [3].

Os NZEB's, são edifícios construídos para tentarem tirar o melhor partido do clima em que estão inseridos, e normalmente estes edifícios produzem energia localmente. Em geral essa energia produzida localmente é proveniente principalmente de energia solar, e está muito dependente do clima a que este se encontra inserido. Tendo em conta que um dos principais impulsionadores dos ganhos internos de um edifício são os ganhos solares, as necessidades de arrefecimento estão largamente ligadas a este tipo de ganhos.

Assim, a ocorrência e persistência de nuvens tem um impacto no consumo energético e na capacidade dos edifícios em permanecer dentro dos limites de conforto sem recorrer a sistemas de arrefecimento mecânicos. Quando há produção solar fotovoltaica (PV), o edifício está a funcionar em regime de autoconsumo, onde a produção PV satisfaz as necessidades de energias. Por outro lado, a ocorrência de nebulosidade pode causar obstrução total ou parcial do disco solar, reduzindo assim a produção PV. Nesse caso, o edifício vai consumir energia da rede, provocando a sobrecarga a rede e, portanto, pode ser sujeito a flexibilidade.

Está flexibilidade de energia em edifícios (*demand flexibility*), é a capacidade de um edifício alterar o seu consumo, aumentando ou diminuindo-o, sempre que haja desfasamento entre a produção e consumo de energia. Assim sendo, se estes eventos de flexibilidade ocorrerem em simultâneo com os períodos de nebulosidade, a capacidade de os edifícios permanecerem dentro dos limites de conforto térmico pode aumentar ou diminuir.

1.2. Objetivos

Existem atualmente vários estudos realizados sobre a flexibilidade de energia dos edifícios, porém, focados essencialmente na estrutura do edifício, e na capacidade de este conseguir armazenar energia térmica durante eventos de flexibilidade do edifício, pré-aquecimento ou pré-arrefecimento [4] [5] [6].

Deste modo, a não existência de um estudo que relaciona a influência da nebulosidade durante eventos de flexibilidade do edifício, leva com que, a presente dissertação tenha como objetivo avaliar o potencial de utilização de períodos de nebulosidade para responder a períodos de flexibilidade no consumo de energia do edifício, e se o aproveitamento desses períodos de nebulosidade terá impacto no conforto térmico dos ocupantes, bem como no consumo de energia elétrica dedicado a climatização.

¹ Artigos 2º e 9º da respetiva Diretiva.

1.3. Estrutura da Dissertação

O segundo capítulo é dedicado à revisão bibliográfica do estado da arte sobre os principais conceitos da variabilidade da nebulosidade, classificação e métodos utilizados para calcular e identificar períodos de nebulosidade, ainda neste capítulo é revisto o conceito de NZEB's e a flexibilidade de energia em edifícios.

No terceiro capítulo, é apresentado a metodologia utilizada na caracterização estatística da nebulosidade utilizando dados de radiação solar medidos de 1 em 1 minuto. Para tal, utilizou-se o índice de claridade, K_T .

No quarto capítulo, apresenta-se o caso de estudo, o modelo de simulação dinâmica do edifício utilizado na análise dos períodos de nebulosidade identificados e selecionados no terceiro capítulo, bem como os sistemas técnicos que o constituem.

O quinto capítulo, apresenta resultados da caracterização estatística da nebulosidade e avaliação do impacto de diferentes eventos de flexibilidade utilizando diferentes períodos de nebulosidade no consumo energético do edifício e o conforto térmico dos ocupantes. Para tal recorre-se a simulação dinâmica de um modelo de simulação de um escritório com dimensão média.

Por último, o sexto capítulo é dedicado as conclusões finais, baseados principalmente nos objetivos propostos e a perspetiva de trabalho futuro durante o desenvolvimento da presente dissertação.

Capítulo II – Estado da Arte

2.1. Variabilidade da Nebulosidade

A radiação solar presente no topo da atmosfera ao passar pela atmosfera terrestre é sujeito a vários processos/interações com os demais componentes da atmosfera, sendo que mais de metade da radiação extraterrestre não chega a superfície terrestre devido a vários processos de interação dos constituintes da atmosfera [7].

O processo ótico, é um dos principais processos presentes na atmosfera descrita como um processo de absorção da energia por um componente da atmosfera em um certo comprimento de onda e transformada em outra forma que não está mais presente na luz [7].

Um dos principais constituintes que contribuem para a maior parte da absorção da radiação solar, é a nuvem. A nuvem é descrita como um conjunto de partículas de água, gelo ou ambos num certo intervalo de tempo que se encontram em concentrações suficientes e visíveis pelo ser humano ou detetadas por imagens térmicas de satélite [8]. Devido à sua forte variabilidade temporal e espacial e aos seus processos químicos complexos é muito difícil estimar os efeitos radiativos das nuvens com uma precisão adequada [9]. Contudo, dependendo da amplitude do ângulo zenital (θ_z), as nuvens terão maior ou menor impacto na dispersão ótica e na redução da radiação solar direta. Assim, nuvens óticamente finas permitem que uma certa quantidade de radiação solar direta chegue a superfície, enquanto nuvens óticamente espessas são consideradas opacas, ou seja não permitem a passagem da radiação solar direta [7].

2.1.1. Tipos de Nuvens e sua Classificação

Existem diferentes tipos de nuvens e dependendo de vários parâmetros elas apresentam dimensões e propriedades diferentes, resultando em diversos efeitos na radiação solar. Assim uma nuvem isolada dependendo ou não da oclusão do Sol, tem um efeito diferente na radiação solar quando comparado com várias nuvens ou céu nublado [8].

De uma forma geral as nuvens são definidas tendo em conta as diferentes fases da água e a temperatura no topo da nuvem. Deste modo, as nuvens podem ser classificadas com base no gênero (principal forma característica da nuvem), espécies (diferenças estruturais internas e peculiaridades da forma da nuvem), variedades (características especiais de transparência e arranjo da nuvem), características adicionais (pequenas nuvens que agregam a uma nuvem de maior dimensão) [8].

As nuvens podem-se concentrar em altitudes diferentes, e dependendo da altitude à que elas se encontram, podem ser denominadas de *Cirrus* (Ci), *Cirrocumulus* (Cc) e *Cirrostratus* (Cs) para altas altitudes, de *Alto cumulus* (Ac), *Altostratus* (As) e *Nimbostratus* (Ns) para altitudes médias, de *Cumulus* (Cu), *Stratocumulus* (Sc), *Stratus* (St) e *Cumulonimbus* (Cb) para baixas altitudes [8].

2.1.2. Métodos Utilizados na Detecção e Classificação das Condições do Céu

Ao longo dos anos tem vindo a ser estudado diferentes métodos de deteção e de classificação das condições do céu.

Sun et al. [10], propôs um algoritmo de deteção de nuvens baseado nas diferenças no espectro de reflexão de nuvens e das superfícies adjacentes utilizando *short wave infrared* (SWIR) visíveis. Para tal, comprimentos de onda na faixa espectral compreendidos entre 400-2500nm são tidos em consideração, e dados de multiespectral de pixéis são utilizados para determinar a diferença espectral entre céu nublado e céu limpo.

C. Li et al. [11], verificou que a utilização de um único limite fixo de parâmetros atmosféricos não resolve todos os problemas na detecção de nuvens a uma escala global, uma vez que os parâmetros atmosféricos variam de região para região. Assim, recentemente desenvolveu um novo método de detecção de nuvens utilizando os dados de PARASOL (*Polarization Anisotropy of Refletances for Atmospheric Sciences Coupled with Observations from a Lidar*), que é uma ferramenta multiespectral, multidirecional e multipolarizada, capaz de fornecer informações importantes sobre a radiação das nuvens e interações climáticas. Este método baseia-se em limites dinâmicos, tendo em consideração diferentes modelos atmosféricos de forma a melhorar a precisão na detecção de nuvens em algumas estações do ano e à escala global.

A condição do céu pode ser classificada tendo em conta o período diurno em três tipos, limpo, intermediário e céu nublado (coberto), baseado em dois métodos, *sunshine duration* e *cloud ratio method*. A *sunshine duration* estima a frequência de ocorrência desses três tipos de condições a partir do valor médio relativo da duração do sol (razão entre a duração da luz do sol e a duração máxima da luz do sol num determinado intervalo de tempo), enquanto que a *cloud ratio method* classifica a condição do céu nos três tipos de céu, limpo, intermediário e nublado, baseado na razão entre a irradiação horizontal difusa (DHI) e a irradiação global horizontal (GHI) [12].

M. Larraneta et al. [13], propôs um modelo de simples abordagem para identificar períodos de céu limpo utilizando dados horários de DNI. Para tal, criou um algoritmo de céu limpo, que analisa a média, o declive e o comprimento da reta da curva de céu limpo medido e teórico com uma resolução horaria, com ajusto empírico do modelo de céu limpo, não sendo, no entanto, sensível a este modelo porque é um método adaptativo e iterativo. Para que haja o ajusto tem de haver mais de 2h de céu limpo. A curva DNI obtida é semelhante a uma curva gaussiana pelo que se fez a divisão em 3 intervalos (1/3 do valor do ângulo solar máximo), partindo de três critérios:

- Média horária – compara-se o tempo de céu limpo e os valores medidos médios, através do cálculo das diferenças percentuais absolutas da irradiação medida e a irradiação de céu limpo, sendo a hora em análise considerado céu limpo quando essa percentagem é menor que 2.5%.
- Declive – compara-se a media de dois pontos que uma reta para cada hora, calculado a partir do quociente entre variação horaria do DNI e a variação do tempo. Para ser considerado céu limpo o declive da irradiação de céu limpo tem de ser igual à irradiação medida.
- Comprimento da reta – consiste na análise do comprimento da reta que esses dois pontos.

Apesar de existirem os métodos anteriores, os mais utilizados são os métodos baseados em valores medidos de radiação solar global e índices adimensionais como fração difusa (K), índice de claridade (K_T) e o índice de transmitância (K_B). A fração difusa, K , é definida como a razão entre a irradiação horizontal difusa e a irradiação horizontal global. O índice de claridade, K_T , corresponde à razão entre irradiação global horizontal e irradiação horizontal global extraterrestre (GHI_{extra}) [14] [15]. O índice de transmitância, K_B , corresponde à razão entre a irradiação solar direta (DNI) e à irradiação horizontal global extraterrestre [16].

M. Marinez-Chico et al. [16], estudou a classificação das condições do céu baseado na atenuação causada pela radiação normal direta utilizando o índice adimensional K_B , com intuito de perceber as flutuações da radiação solar provocada pela variabilidade das condições do céu e determinar o recurso solar disponível no local de estudo. O índice K_B foi calculado a partir de dados de radiação e imagens do céu da estação radiométrica de Almeria coletados com uma elevação solar de 10° entre agosto de 2009 e julho de 2010, com uma periodicidade de 1 minuto de forma a detetar as variações rápidas das nuvens. Os eventos de atenuação foram caracterizados considerando o nível de opacidade da nuvem e altitude

da nuvem. Foi possível concluir que mais de 40% dos dias analisados correspondiam a dias de céu limpo correspondentes ao equinócio de primavera e solstício de verão.

- $K_B < 0.2$ nuvens de altitude baixa e média e totalmente opacas.
- $0.2 < K_B < 0.4$ nuvens de altitude média e alta com opacidade mais baixa que a categoria anterior.
- $0.4 < K_B < 0.6$ dominado geralmente pelas nuvens *Ci* com uma ligeira opacidade.
- $K_B > 0.6$ nuvens *Ci* impossíveis de ver ao olho nu que não possuem opacidade suficiente para bloquear a radiação solar.

A classificação das condições do céu também utilizando o índice de claridade, K_T . O céu é classificado de céu nublado se K_T é inferior a 0.2, de intermediário se K_T está entre 0.2 e 0.6, e de céu limpo se K_T é superior a 0.6 [17]. *Reindl et al.* [18], considerou um K_T superior a 0.6 para céu limpo e um K_T inferior a 0.2 para céu nublado. *Li et al.* [19], propôs um K_T inferior a 0.15 para céu nublado, K_T superior a 0.15 para céu intermediário e K_T superior a 0.7 para céu limpo.

Reno and Hansen [20], propuseram um algoritmo para a identificação de céu limpo e nublado, utilizando GHI com resolução de 1 minuto. O algoritmo proposto é dependente do modelo de céu de limpo, e estima a radiação na superfície da terra para um determinado local e tempo abaixo das condições do céu. Para tal, utilizaram o índice de claridade K_T , calculado a partir da radiação extraterrestre, mas a irradiação de céu limpo é dependente dos parâmetros atmosféricos. O algoritmo identifica períodos de céu limpo e nublado comparando as características visuais da curva de GHI e do tempo, incluindo um método de interação para ajustar escala do modelo de céu limpo e adaptar aos dados locais.

Quase a maioria dos métodos apresentados na identificação das condições do céu nesta revisão bibliográfica utilizam dados de radiação solar com uma periodicidade de 1 minuto, deste modo, é possível identificar variações rápidas de radiação solar incidente numa superfície horizontal, reduzindo assim os erros na identificação períodos de nuvem.

2.2. NZEB's Definição

Os NZEB's são edifícios que advém do conceito *Zero Energy Buildings* (ZEB). São edifícios durante um determinado período conseguem ter um balanço energético neutro, ou seja, estes conseguem produzir a mesma quantidade de energia consumida [21].

Existem várias definições para NZEB, e elas são adaptadas dependendo das condições climáticas de cada região. De acordo com a definição adotada pela Comissão Europeia através da publicação EPBD-recast, (*Energy Performance of Buildings Directive recast*) Diretiva 2010/31/EC [2], um NZEB é um edifício com desempenho energético muito elevado, com necessidades de energia quase nula ou muito pequena, e que estas necessidades de energia deverão ser suportadas por fontes de energia renováveis produzidas localmente e quantificada em kWh/m², sendo que os fatores de energia primária utilizados na determinação da energia primária que se deve utilizar podem basear-se em valores médios anuais nacionais ou regionais tendo em consideração as normas europeias relevantes [21].

Segundo a definição adotada pelo DOE (Departamento de Energia dos EUA), um NZEB é um edifício energeticamente eficiente, onde a energia anualmente fornecida é menor ou igual a energia produzida localmente [21].

2.3. Flexibilidade de Energia do Edifício.

A diretiva para a energia renovável exigia que até pelo menos 2020, pelo menos 20% da energia produzida nos países da UE provêm de fontes de energia renováveis. Assim, para que haja uma elevada penetração de geração renovável variável é necessário ter flexibilidade no consumo de energia. Com a

introdução do conceito NZEB, a produção local de aquecimento e energia, impôs novos desafios à rede elétrica, sendo que nesses casos a flexibilidade energética dos edifícios poderá significativamente contribuir para minimizar desfasamentos temporários entre a procura e a geração de energia [22].

Segundo a Agência Internacional de Energia em Edifícios e Comunidades (IEA EBC), Anexo 67, a flexibilidade energética do edifício é definida como a “*capacidade de gerir a procura e geração de acordo com as condições climáticas locais, necessidade dos ocupantes e os requisitos de redes de energia. A flexibilidade de energética dos edifícios permitirá uma gestão da procura/controlo de carga e, portanto, a resposta da procura baseado nos requisitos da rede de energia local*” [23].

Um conceito que caracteriza a flexibilidade de energia de um edifício, é o *Demand Response* (DR), que de forma muito vasta significa a resposta do consumidor final de energia a variação de preços de eletricidade estipulado pela fornecedora de energia elétrica. Dessa forma, o cliente pode utilizar os períodos de pico de produção para transferir consumos energia dos equipamentos elétricos, assim, ajuda no equilíbrio dos fluxos energéticos existentes entre a produção e consumo de energia final, e ainda economiza na fatura de eletricidade. *Demand Response* pode ser definido especificamente pela “*alteração nos padrões normais no uso da eletricidade por parte do consumidor final em resposta a alterações do preço de eletricidade ao longo do tempo, ou pagamentos de incentivos para induzir um menor uso de eletricidade nos períodos de picos de consumos de eletricidade ou quando a confiabilidade do sistema é comprometida.*” [24].

Em quase todos os países desenvolvidos cerca de 30-40% da energia consumida é utilizada para climatização, controlos, iluminação e equipamentos utilizados pelos ocupantes [23]. Estes consumos podem ser deslocados no tempo, mas é necessário ter em atenção o conforto dos ocupantes [23]. Para certos intervalos de tempo consegue-se fazer uma gestão de consumo de energia, ou comumente designado *Demand Side Management* (DSM), aproveitando a estrutura construtiva do edifício como um armazenador térmico, e dessa forma fazer o pré-aquecimento e ou pré-arrefecimento, no entanto, é necessário determinar a *priori* o tempo necessário para o fazer, uma vez que está esta dependente da massa térmica e das perdas de calor do edifício, o perfil de consumo e o clima em que o edifício se encontra inserido [23].

DSM surgiu logo após a crise energética em 1973 nos EUA (Estados Unidos da América), com o propósito de reduzir o pico de consumo de energia através de medidas introduzidas pelo fornecedor de energia e pelo próprio consumidor na tentativa de alterar os padrões de consumo. Para os fornecedores de energia, DSM significa evitar ou ganhar mais tempo para o aumento de capacidade de produção de energia, para o consumidor doméstico significa uma poupança na fatura elétrica, e para a indústria uma redução do custo de produção [25].

Não obstante, em alguns edifícios não é possível reduzir o consumo de energia em certos períodos do ano, pois, é necessário é necessário aquecer ou arrefecer os espaços para não causar desconforto aos ocupantes. Essa necessidade de energia é muito afetada pelo tipo de clima que o edifício está inserido. Por exemplo, um edifício com uma elevada exposição solar e um isolamento térmico inadequado, implica um ganho solar proporcional à quantidade de radiação solar incidente, aumentando assim as necessidades de arrefecimento [26].

Ao longo das últimas décadas, o armazenamento térmico da estrutura do edifício tem sido alvo de muito estudo. Muitos desses estudos são focados no potencial da inércia térmica do edifício como estratégia para projetos solares passivos.

O potencial para melhorar o balanço entre a energia utilizada para aquecimento de um NZEB através do armazenamento térmico estrutural ativo foi estudado por *Reynders et al.* [27], onde mostraram a

possibilidade de utilizar a estrutura térmica do edifício como armazenamento térmico. Os resultados obtidos mostram que a utilização de períodos de pico de produção PV no pré-aquecimento é mais eficaz quando é utilizado num curto intervalo de tempo, sendo capaz de reduzir significativamente os picos de consumos domésticos. Todavia, não consegue reduzir incompatibilidades sazonais a longo prazo, entre o consumo de energia dedicado ao aquecimento e a produção PV, por outro lado, este não é replicável a edifícios existentes.

Le Dreau et al. [28] analisou a influência da massa térmica interna e a qualidade da envolvente dos edifícios na flexibilidade de aquecimento, e concluiu que edifícios têm uma curta autonomia quando tem um isolamento térmico fraco, enquanto edifícios passivos (bem isolados) têm uma longa autonomia. Dessa forma, é necessário utilizar diferentes estratégias de controlo para equilibrar a flexibilidade de energia.

Verbeke et al. [29], concluiu que o aumento da inércia térmica do edifício pode contribuir largamente para melhorar o conforto térmico, contudo para muitos climas (climas quentes apresentam melhor desempenho na redução da necessidade de energia com o aumento da massa térmica do edifício do que climas frios) a redução das necessidades energéticas do edifício não é significante.

Recentemente *Panão et al.* [30], mostrou que as necessidades de aquecimento ambiente no inverno dos edifícios residenciais podem ser antecipadas, fazendo o pré-aquecimento da massa térmica interna do edifício, utilizando para tal, as salas como sistemas de baterias térmicas.

Como visto nos parágrafos anteriores ao longo das últimas décadas têm sido realizados vários estudos focados na flexibilidade dos edifícios aproveitando o potencial estrutural do edifício, contudo, ainda não foi feito nenhum estudo sobre a influência da ocorrência de nebulosidade durante períodos de flexibilidade do edifício, e o impacto que este tem no arrefecimento do edifício e no conforto térmico dos ocupantes.

Capítulo III – Metodologia: Identificação de Períodos de Nebulosidade

No presente capítulo é abordado a metodologia utilizada na identificação de períodos de nebulosidade. A primeira secção, recai sobre a recolha de dados e análise de dados climáticos com uma resolução de 1 minuto. A segunda secção, descreve a criação do método utilizado na identificação de períodos de nebulosidade. Para tal, utilizou-se o índice de claridade, K_T , e classificou-se os dias como dias de céu limpo, dias céu nublado e dias com períodos de nebulosidade.

3.1. Análise e Recolha de Dados

O desenvolvimento da presente dissertação iniciou com a recolha de dados climáticos com periodicidade de 1 minuto da estação meteorológica de Oregon, EUA [31], e com a recolha dos seguintes parâmetros climáticos necessários para a deteção de períodos de nuvens e a criação de um ficheiro climático EPW.

- Temperatura do ar exterior, °C
- Temperatura do ponto de orvalho, °C
- Irradiação solar global horizontal, Wm^{-2}
- Irradiação solar difusa horizontal, Wm^{-2}
- Irradiação solar direta normal, Wm^{-2}
- Pressão atmosférica, Pa
- Velocidade do vento, ms^{-1}
- Direção do vento, graus

A maioria destes parâmetros climáticos já se encontravam calculados *a priori*, porém foi necessário determinar a temperatura do ponto de orvalho (T_{dew}) a partir da equação (1), onde o T_{out} representa a temperatura exterior e RH representa a humidade relativa [32].

$$T_{dew} \approx T_{out} - \frac{100 - RH}{5} \quad (1)$$

3.2. Método Utilizado na Identificação de Períodos de Nebulosidade

Como foi mencionado no Capítulo II, existem diferentes métodos utilizados na identificação de períodos de nebulosidade. Para o desenvolvimento desse trabalho optou-se por utilizar um método baseado no índice de claridade (K_T), que relaciona a irradiação horizontal global (GHI) recolhido da estação meteorológica de Oregon, com a irradiação horizontal global extraterrestre (GHI_{extra}), calculado a partir da equação (2). Para tal, foi utilizado a ferramenta *Python in Pandas* para analisar e efetuar os cálculos matemáticos necessários para essa identificação. *Pandas* é uma biblioteca *Python*, que ajuda à manipulação de tabelas de dados ou outras importantes tarefas dedicadas a um ambiente de programação orientado a objetos [33].

$$K_T = \frac{GHI}{GHI_{extra}} \quad (2)$$

As equações apresentadas a seguir são equações secundárias utilizados para o cálculo de GHI_{extra}

3.2.1. Declinação Solar

A inclinação de 23.45° do eixo de rotação da Terra relativamente à normal do plano elipsoidal, causa uma variação da incidência da radiação diária devido à rotação da Terra em torno do seu eixo e uma variação sazonal provocado pela posição do eixo em relação ao Sol [34].

Não obstante, o ângulo formado pela união da linha do centro do Sol ao centro da Terra apresenta uma variação constante. Esse ângulo denomina-se de declinação solar e apresenta um valor de 0° nos equinócios de outono e primavera, e um valor de 23.45° no solstício de verão e de -23.45° no solstício de inverno. O seu valor pode ser calculado de forma simplificada através da equação (3) [34], onde δ corresponde à altitude solar, e n corresponde ao dia juliano.

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284 + n)}{365}\right) \quad (3)$$

3.2.2. Equação do Tempo

Um ciclo solar corresponde ao intervalo de tempo que o Sol faz desde o seu nascer até se pôr no horizonte, correspondente a um dia solar relativamente a um objeto estacionário. A duração deste ciclo varia ao longo do ano devido à trajetória elipsoidal da Terra em torno do Sol e, pela inclinação da Terra em relação ao plano elipsoidal [34].

Por este motivo, a duração do dia não se realiza necessariamente num ciclo perfeito de 24h ao longo de um ano, podendo o mesmo ocorrer num ciclo maior ou menor. Assim para corrigir essas variações do tempo recorre-se à equação do tempo, descrito matematicamente pela equação (4) [34].

$$ET = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad (4)$$

Onde: $B = \frac{360(n-81)}{365}$

3.2.3. Fator de Correção do Tempo

A excentricidade da órbita da Terra e aos ajustes feitos pelo Homem na definição de fusos horários, faz com que seja necessário realizar uma correção provocada pela diferença entre a longitude local (λ_{LOC}) e a longitude do meridiano de referência (λ_{SMT}), bem como a adição da equação do tempo à hora local, sendo o fator de correção do tempo dado pela equação (5) [34].

Onde ΔT_{GMT} corresponde à diferença entre a hora local e o tempo medio de Greenwich em horas, e o fator de multiplicação 4 é devido ao facto de a Terra rodar 1 grau a cada 4 minutos.

$$\begin{aligned} \lambda_{SMT} &= 15\Delta T_{GMT} \\ TC &= 4(\lambda_{LOC} - \lambda_{SMT}) + ET \end{aligned} \quad (5)$$

3.2.4. Ângulo Horário

Este ângulo converte o tempo solar local (LST) no ângulo correspondente ao movimento do Sol. Antes do nascer até o meio-dia solar o ângulo tem um valor negativo e positivo depois do meio-solar, sendo nulo exatamente no meio-dia solar (correspondente à máxima altitude do Sol). O seu valor pode ser quantificado pela equação (12) [6], onde $LST = LT + \frac{TC}{60}$, e o fator de multiplicação 15 representa a velocidade de rotação da Terra de 15° por hora.

$$\omega = 15(LST - 12) \quad (6)$$

3.2.5. Ângulo Zenital

O ângulo de incidência numa superfície horizontal denominado de ângulo zenital (θ_z), é o ângulo formado entre o zénite local e a linha que junta o Sol a um observador na superfície terrestre. O seu valor varia entre os 0° e 90° quando o Sol está acima do horizonte, e pode ser calculada através da equação (7) [34], onde ϕ corresponde a latitude.

$$\theta z = \cos^{-1} (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) \quad (7)$$

3.2.6. Radiação Horizontal Extraterrestre

A rotação da Terra em torno do Sol num formato elipsoidal causa uma variação da distância Terra-Sol ao longo de um ano. Essa variação da distância leva a uma variação da radiação solar extraterrestre incidente, fazendo com que ocorra um valor mínimo em junho (quando a distância é máxima), e um valor máximo em janeiro (quando a distância é mínima) [35].

A variação da incidência da radiação extraterrestre ao longo do ano é dada pela equação (8), e apresenta uma variação de cerca de $\pm 3.4\%$ em relação ao valor de densidade de potência média dada pelo constante solar (G_{SC}) [35], com um valor de 1361.1 W/m^2 , este valor foi apresentado após um estudo realizado da sua evolução ao longo de 42 anos, e apresentou uma incerteza de 0.51 W/m^2 [36].

$$\frac{GHI_{extra}}{G_{SC}} = 1 + 0.033 \text{Cos} \left(\frac{360n}{365} \right) \quad (8)$$

Sabendo *a priori* o ângulo incidente na perpendicular a essa superfície θz , determina-se GHI_{extra} pela equação (9) [37].

$$GHI_{extra} = G_{SC} \left[1 + 0.033 \text{Cos} \left(\frac{360n}{365} \right) \text{Cos}(\theta z) \right] \quad (9)$$

3.2.7. Identificação de Períodos de Nebulosidade

A utilização do índice de claridade (K_T) na identificação de períodos de nebulosidade, prende-se com o fato de ser um método simples, e permitir identificar com alguma facilidade períodos de nebulosidade. Para a identificação dos períodos de nebulosidade assumiu-se de acordo com a literatura que valores de K_T superiores a 0.6 são considerados céu limpo e valores de K_T inferiores a 0.6 são considerados céu limpo.

Para identificar períodos de nebulosidade, fez-se uma análise entre as 8h e 18h dos valores de K_T . Essa análise incluiu a verificação de períodos consecutivos de K_T inferiores a 0.6 com duração superior a 5 minutos. Este período de K_T inferiores a 0.6 tinha de ser antecedido e sucedido por um período de sol ou período de céu limpo ($K_T > 0.6$), como mostra a figura à direita na Figura 1, com um período de nebulosidade notável as 14h.

A identificação dos dias de céu limpo foi feita através da análise dos valores de K_T entre as 8h e 18h. Sabendo que o pico de radiação solar é atingido ao meio-dia solar, portanto os valores de K_T tendem a aumentar para valores superiores a 0.6 até o meio-dia solar, e depois, tendem a diminuir suavemente formando uma curva semelhante a uma curva de Gauss, como mostra o exemplo no canto esquerdo da Figura 1. Assim, se não houver nenhuma variação abrupta dos valores de K_T durante esse mesmo período, esse dia é considerado um dia de céu limpo.

Visto que o propósito deste trabalho se prende com a identificação de períodos de nebulosidade intercalados com períodos de céu limpo e posterior utilização dos mesmos em eventos de flexibilidade, não foram considerados dias de céu nublado, ou seja dias com K_T sempre inferiores a 0.6 (representado pelo exemplo central da Figura 1).

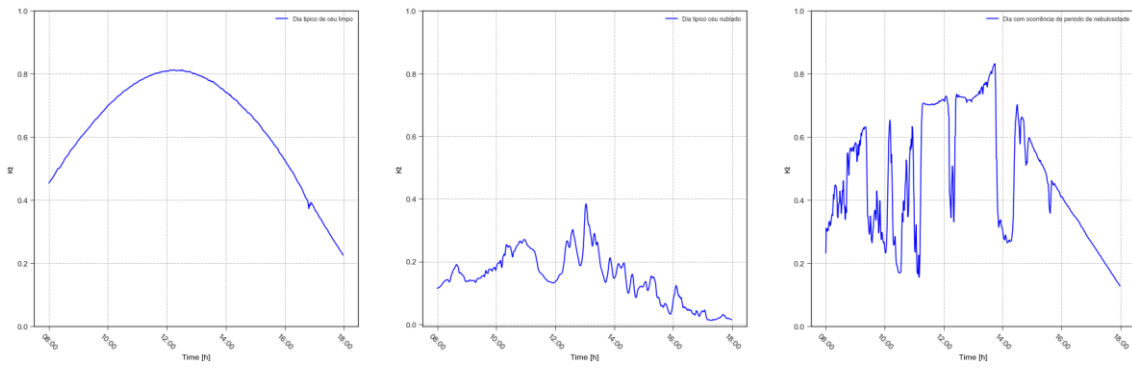


Figura 1: Exemplo das condições do céu

Capítulo IV – Caso de Estudo

O caso de estudo consiste na análise do impacto de eventos de flexibilidade que ocorrem durante períodos de nebulosidade no consumo energético num edifício. Para identificar períodos de nebulosidade, recorreu-se a 3 anos de dados de irradiação solar global horizontal (2017,2018,2019) de uma estação meteorológica situada no estado de Oregon, representado na Figura 2.

A estação meteorológica fica situada a 44.0467° de latitude e a -123.07743° de longitude com uma elevação de 133.8 metros [31]. O clima dominante segundo a classificação de Köppen é o Csb [38]. O clima Csb é caracterizado por ser um clima temperado dominado por verões secos e quentes [38].

Para avaliar o impacto de períodos de nebulosidade, utilizou-se um modelo simulação dinâmica de um escritório de dimensão média [39]. O modelo de simulação é focado no piso intermédio com uma área útil de pavimento de $1100,9\text{m}^2$. Para avaliar o comportamento térmico do edifício, recorre-se ao *EnergyPlus®* que é um software que permite fazer a simulação dinâmica de um modelo de simulação de um edifício, baseado nos princípios de transferência de calor, com o objetivo de obter o perfil de consumo de energia, facilitando uma avaliação detalhada de vários sistemas técnicos tais como climatização, ventilação natural e mecânica, iluminação artificial e natural, produção e distribuição de energia, e muitos outros [40].

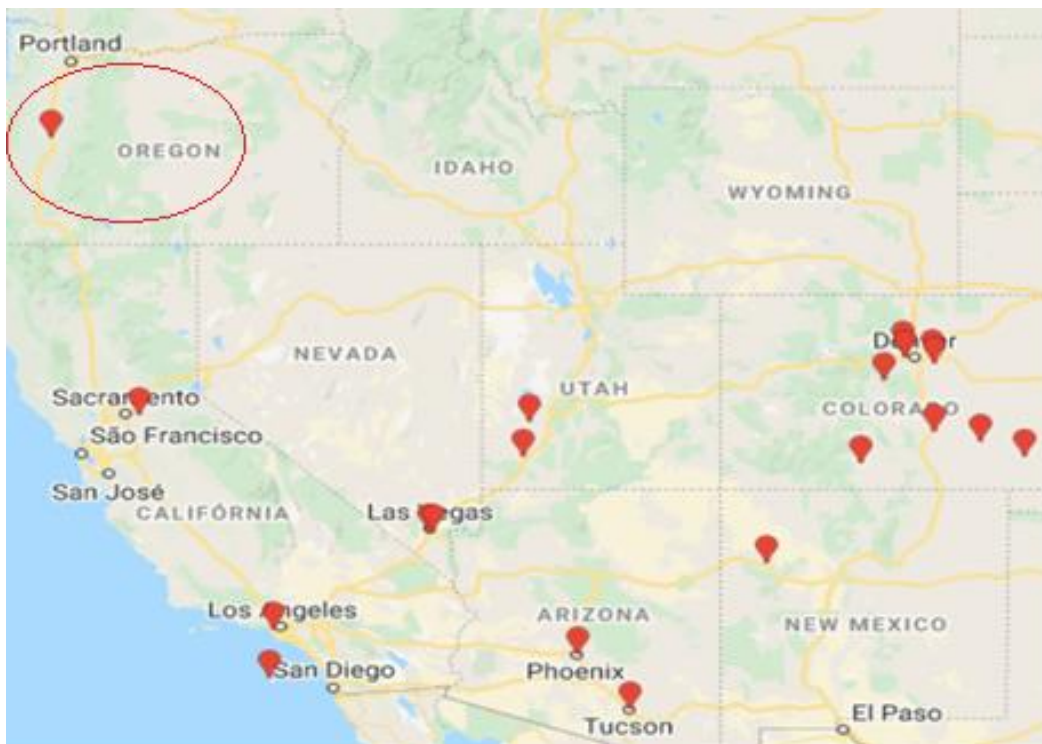


Figura 2: Localização geográfica Oregon [31]

4.1. Simulação Dinâmica

A delimitação de uma zona envolvendo elementos arquitetónicos (paredes, cobertura, lajes de pavimento, portas e janelas) permite estancar o que pode ser designado de um edifício, proporcionando um ambiente de conforto e de proteção para certos elementos externos. O nível de conforto, térmico, acústico e visual, e a utilização de fontes de energias naturais (luz solar, ventilação natural) impõem dificuldades acrescidas e muitas vezes o que poderia ser uma solução torna-se um problema, devido às

condições do clima local e à existência de poluentes no ar. Assim, para contornar essa situação normalmente recorre-se a formas artificiais de iluminação, climatização e ventilação.

O consumo de energia dedicado a essas formas artificiais está muito dependente do comportamento térmico do edifício e da forma como essa energia é utilizada, deste modo, é primordial estimar todos os fluxos de energia relevantes que permitem avaliar o real impacto do consumo de energia de um edifício. Para tal, a construção de um modelo de simulação que define todos os elementos físicos de cada zona térmica, os sistemas de climatização, ventilação, iluminação, o perfil de ocupação e de utilização de cada um desses sistemas técnicos é essencial.

A construção/criação de um modelo de simulação para avaliar o comportamento térmico de um edifício exige algum cuidado, pois todos os fenómenos de transferências de calor são variáveis no tempo, e são associados ao efeito de inércia térmica do ar e dos materiais construtivos que constituem cada divisão.

4.1.1. Balanço Térmico

O impacto da ocorrência de nebulosidade no edifício, pode ser explicado pelo a expressão (10) do balanço térmico interno do edifício. A ocorrência de nebulosidade implica uma redução dos ganhos solares e conseqüentemente diminuição do fluxo de radiação solar que é absorvido pelas superfícies (q''_{sol}), com isso o ganho de calor sofrerá uma redução devido a essa redução do ganho solar na massa térmica interna [41]

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (10)$$

Onde:

- q''_{LWX} , corresponde ao fluxo radiante de onda longa entre as superfícies interiores da zona
- q''_{SW} , corresponde ao fluxo radiante de onda curta das lâmpadas para as superfícies interiores da zona
- q''_{LWS} , corresponde ao fluxo radiante dos equipamentos da zona
- q''_{ki} , corresponde ao fluxo de condução de calor nas paredes interiores da zona
- q''_{sol} , corresponde ao fluxo de radiação solar absorvido pelas superfícies interiores da zona
- q''_{conv} , corresponde ao fluxo convectivo do ar interior da zona

4.1.2. Ganhos Internos

Para que um modelo de simulação esteja o mais próximo possível da realidade é indispensável a recolha de informações sobre os ganhos internos principais da maioria dos edifícios de serviços, sistema de iluminação artificial, equipamentos e ocupação.

O perfil de ocupação é constante das 8h às 18h todos os dias da semana, de forma a poder comparar períodos de nebulosidade em diferentes períodos do dia, e estes serem minimamente comparáveis entre si. O perfil de carga do sistema de iluminação e o perfil de carga dos equipamentos está dependente da área de cada divisão. Na Tabela 1 está discriminado a carga do perfil de ocupação por área, e a densidade potência do sistema de iluminação e equipamentos.

Tabela 1: Carga interna de cada zona

Zona	Área [m ²]	Ocupação [pessoas/m ²]	Iluminação [W/m ²]	Equipamentos Elétricos [W/m ²]
Sul/Norte	364.42	0.06	8.07	9.74
Este/Oeste	68.35	0.06	8.07	9.74

4.2. Modelo de Simulação do Edifício

4.2.1. Zonas Térmicas

Um modelo de simulação é definido por ser constituído por uma ou mais zonas térmicas definindo um volume de controlo. *EnergyPlus* considera somente o volume de controlo, ou seja, considera somente o volume de ar e não tem em conta a espessura das superfícies.

O edifício em análise trata-se de um escritório baseado num edifício da Califórnia, constituído por quatro ocupadas (Zona Sul, Norte, Este e Oeste) representadas na Figura 3, e zonas ao centro que não estão ocupadas, e, portanto, essas zonas localizadas ao centro não possuem qualquer perfil de carga ou ocupação por serem consideradas zonas com reduzida significância no impacto do comportamento térmico do edifício.

As quatro principais zonas representadas na Figura 3, possuem perfil de ocupação, perfil de carga de equipamentos e iluminação, sistema climatização (aquecimento/arrefecimento e ventilação mecânica). Para além do sistema de climatização, o edifício possui dois sistemas de sombreamento passivos, palas horizontais e estores exteriores de alta refletividade instalados em todos os vãos envidraçados com ativação permanente. No presente trabalho, não será utilizada as janelas para ventilar, pelo que estarão sempre indisponíveis para aberturas, para tal, a renovação do ar novo (insuflação e extração) é assegurado por um sistema de ventilação mecânica.

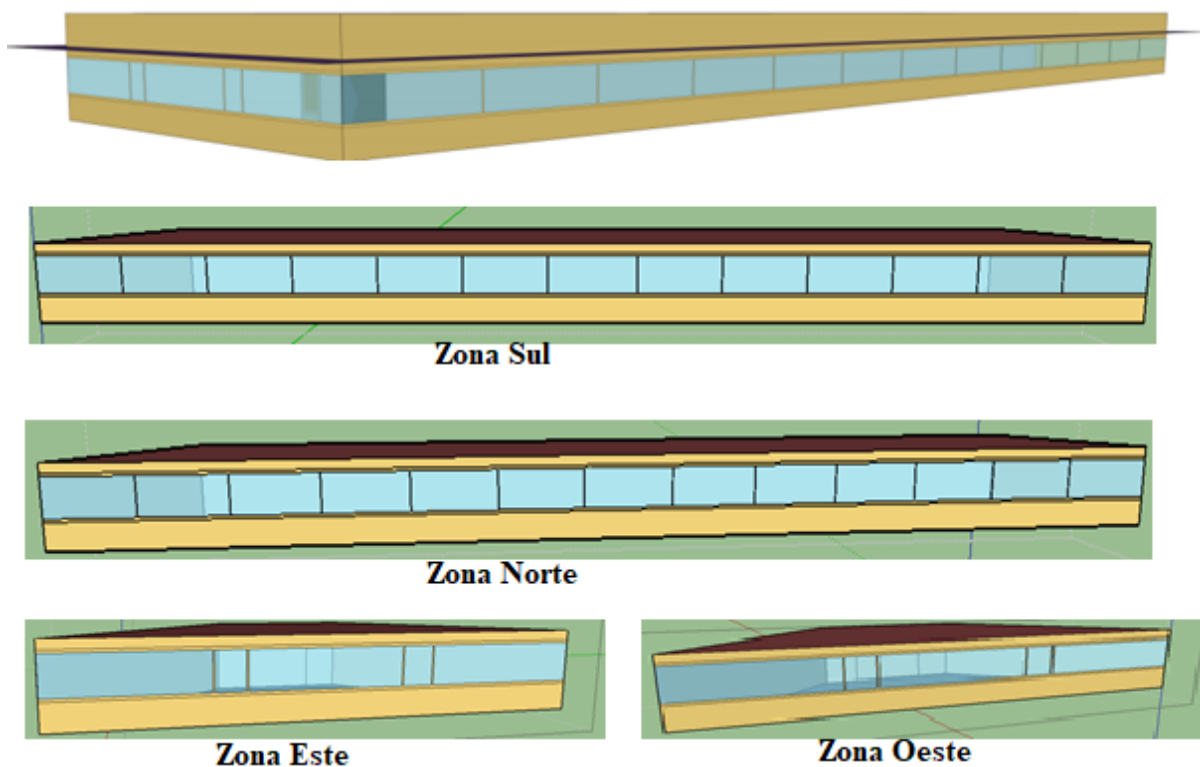


Figura 3: Modelo geométrico do Califórnia Office introduzido no EnergyPlus

4.2.2. Sistema AVAC

O sistema AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado) do edifício é constituído por uma unidade de tratamento de ar novo acoplado a uma bomba de calor. O sistema AVAC, foi modelado no *EnergyPlus* com recurso ao objeto *HVACTemplate: Zone: PTHP*, com características técnicas de

operacionalidade de arrefecimento e aquecimento calculadas a partir de um COP dinâmico. O ar é climatizado com temperaturas compreendidas entre 20°C (set-point aquecimento) e 22°C (set-point arrefecimento).

O modelo aplicado a modelação da UTAN (PTHP), não permite obter de forma imediata o consumo de energia elétrica, pelo que, é necessário tratamento dos resultados para determinar a energia elétrica dedicado a climatização e ventilação. O output dado pelo PTHP é a energia térmica, sendo necessário a conversão para a energia elétrica pela definição de um COP dinâmico dado pelas expressões (11) e (12) de acordo com a metodologia de *Martins et al.* [42], onde o η_t corresponde ao rendimento técnico. O Consumo de energia dedicado a ventilação mecânica (insuflação e extração) foi obtido através das expressões (13) e (14), onde Δp_{vent} corresponde à perda de carga no sistema em [Pa], o caudal de insuflação corresponde (\dot{V}_{in} , [m³/s]) e o caudal de extração (\dot{V}_{ex} , [m³/s]) e η_v à eficiência do ventilador.

$$COP_{aq} = \eta_t \cdot \frac{T_{dist} + 278,15}{(T_{dist} + 5) - (T_{\infty} - 5)} \Bigg|_{T_{dist}=50^{\circ}C \wedge \eta_t=0,677} \quad (11)$$

$$COP_{arr} = \eta_t \cdot \frac{T_{dist} + 268,15}{(T_{dist} + 5) - (T_{\infty} - 5)} \Bigg|_{T_{dist}=0^{\circ}C \wedge \eta_t=0,541} \quad (12)$$

$$P_{vent,in} = \frac{\Delta p_{vent,in} \cdot \dot{V}_{in}}{\eta_{v,in}} \Bigg|_{\Delta p_{vent,in}=1428Pa \wedge \eta_{v,in}=0,650} \quad (13)$$

$$P_{vent,ex} = \frac{\Delta p_{vent,ex} \cdot \dot{V}_{ex}}{\eta_{v,ex}} \Bigg|_{\Delta p_{vent,ex}=750Pa \wedge \eta_{v,ex}=0,621} \quad (14)$$

4.2.3. Massa Térmica Interna do Edifício

Existem duas formas/abordagem para representar a massa térmica interna no *EnergyPlus* e estão representadas na Figura 4. Uma abordagem é representar esses objetos (podem ser mobílias da casa, divisórias e livros) atribuindo especificações de construção representando uma certa área da zona. Outra abordagem passa por utilizar o *temperature capacitance multiplier*, ou seja, a massa térmica interna é representada pela capacidade térmica de ar da zona [43].

A “*InternalMass*” é um objeto utilizado para representar a área de massa interna e especificar materiais de construção dentro de uma determinada zona térmica no *EnergyPlus*. Essa massa térmica interna é importante, pois é um parâmetro tido em conta no balanço térmico e nas trocas radiativas dentro de uma zona/divisão, considerados elementos importantes para o cálculo da transferência de calor através da troca de energia das superfícies dos objetos por convecção na zona. No entanto, a representação dessa massa térmica interna utilizando o objeto “*InternalMass*” não permite ter uma representação adequada dos objetos, pois a sua representação geométrica é muito simplista e não tem uma localização exata no espaço. Por outro lado, este não tem em conta o ganho de calor superficial da massa interna, pois não é tido em conta o calor solar proveniente dos vãos envidraçados, introduzindo dessa forma incertezas nos resultados da simulação [43]. A massa interna original do edifício é constituída por madeira, com sua

característica termofísica e área de superfície (duas vezes a área de pavimento da zona) representado no objeto “*InternalMass*” especificada na Tabela 2.

Tabela 2: Características termofísicas e área superficial da massa interna original do edifício

Espessura [m ²]	Condutividade [W/m-K]	Densidade [kg/m ³]	Calor Específico [J/kg-K]	Absorção solar	Área superficial [m ²]	
					Zona Sul/Norte	Zona Este/Oeste
0.10	0.12	540	1210	0.70	728.84	136.70

Para realização desse trabalho optou-se por utilizar um objeto alternativo do *EnergyPlus* denominado “*ZoneCapacitanceMultiplier:ResearchSpecial*”, que permite utilizar o conceito de capacitância térmica do ar no cálculo do balanço térmico de uma zona térmica, dessa forma é possível considerar o impacto do calor proveniente dos vãos envidraçados no cálculo dinâmico da zona térmica, para tal, é utilizado o *temperature capacity multiplier* que é um multiplicador que varia de acordo com o tipo de massa térmica interna do edifício [43] [44].

A utilização de um *temperature capacity multiplier* aumenta a capacidade equivalente do ar da zona para representar o armazenamento efetivo da capacidade da massa térmica interna, sendo que o valor 1 representa uma zona térmica sem massa térmica interna e que a capacitância é proveniente somente do ar da respectiva zona. Valores superiores a 1, significa que a zona é mobiliada e que existe massa térmica interna. *Hoon Lee and Hong* [44] [45], sugerem a utilização de um multiplier entre 3 e 6 para escritórios considerados leves, entre 6 e 10 para escritórios com uma configuração típica e entre 10 e 15 para escritórios com uma massa térmica interna pesada.

Para identificação do multiplier correspondente a massa interna original do edifício, simulou-se o modelo utilizando a massa interna original, e através de tentativa erro utilizando vários valores de multiplier, descobriu-se que a *internal mass* original do edifício corresponde a um *capacity multiplier* de 6.

Comparando o *internal mass* com o *capacity multiplier* utilizando o NMBE (*Normalized Mean Bias Error*) e CVRMSE (*Coefficient of Variance of Root Mean Square Error*), os erros obtidos aplicando as expressões (15) e (16) e quantificados na Tabela 3 são inferiores a 10% e 30% [46] [47], o que indica que os valores são aceitáveis. Onde y_i corresponde a temperatura obtida pela simulação com o *capacity multiplier* de 6, \hat{y}_i corresponde a temperatura obtida com a simulação dinâmica utilizando o *internal mass* original do edifício, e \bar{y} o valor médio da y_i .

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{\bar{y} \times n} \times 100 \quad (15)$$

$$CVRMSE = \frac{(\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / n)^{1/2}}{\bar{y}} \times 100 \quad (16)$$

Tabela 3: Temperatura simulada com “*ZoneCapacitanceMultiplier:ResearchSpecial*” e temperatura simulada com *Internal Mass*

Zona	Sul	Oeste	Este	Norte
NMBE	0.41%	0.35%	0.25%	0.49%
CVRMSE	2.57%	2.61%	2.55%	2.64%

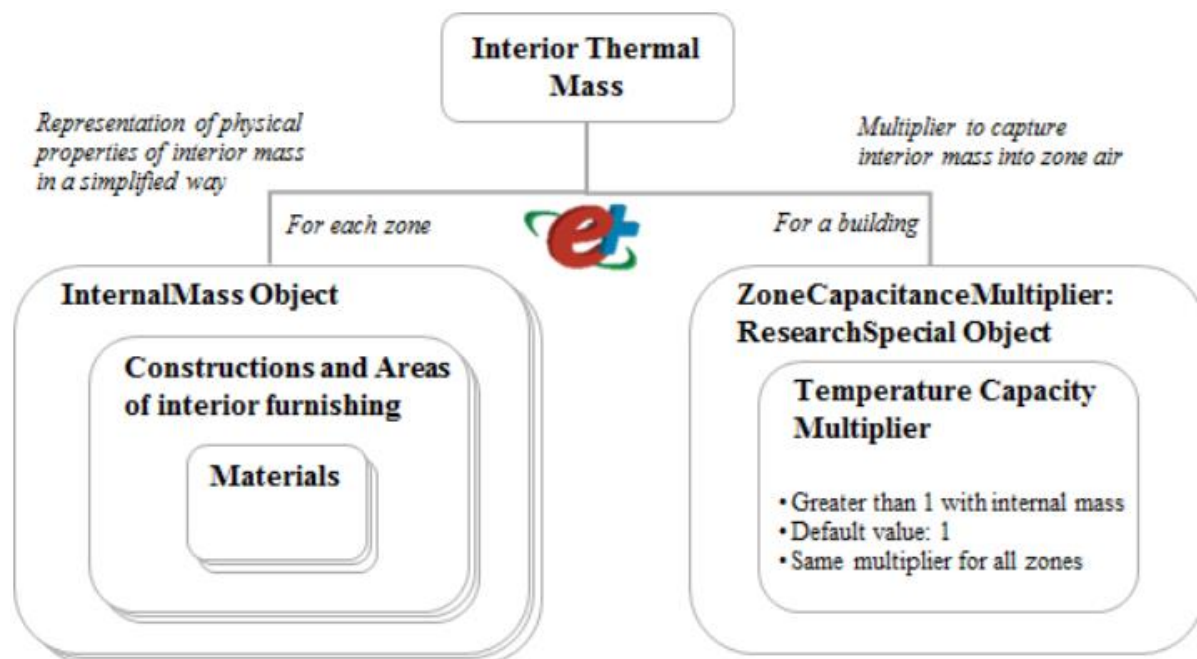


Figura 4: Duas abordagens de representar a massa térmica interna no EnergyPlus [43].

4.2.4. Simulação de Eventos de Flexibilidade

Para analisar o impacto dos eventos de flexibilidade no consumo de energia e no conforto térmico dos ocupantes, criou-se três cenários com diferentes massas térmicas internas. Para cada evento de flexibilidade analisado nos três cenários, fez-se duas simulações, representando dois casos. O primeiro caso representa o caso de referência, o segundo caso representa o caso do evento de flexibilidade onde é considerado o período de nebulosidade. Cada caso foi simulado por um total de 7 dias. 6 dias antes do evento de flexibilidade mais o dia com o evento, ou seja, um total de 7 dias, de forma a permitir a estabilização térmica do modelo de simulação. A simulação foi feita com dados com 60 minutos de time-step (1 em 1 minuto). No primeiro caso, o edifício funciona sempre com o AVAC ligado (ON) das 8h as 18h. No segundo caso desliga-se o AVAC (OFF), quando há um período de nebulosidade. A Figura 5 exemplifica o controlo do sistema AVAC durante o processo de simulação dinâmica de um evento de flexibilidade, onde a cor cinzenta ilustra o período de nebulosidade, AVAC OFF.

Os períodos de nebulosidade foram seleccionados de forma que os eventos de flexibilidade fossem comparáveis entre si. Assim, para a seleção dos eventos de flexibilidade teve-se em conta a duração do período de nebulosidade e a temperatura máxima diária.

Para avaliar o impacto de cada evento de flexibilidade no consumo de energia do edifício, calculou-se o consumo de energia no cenário do evento de flexibilidade através do consumo de energia dedicado a climatização durante o período de nebulosidade (AVAC OFF), e após o evento de flexibilidade (AVAC ON) até a zona térmica atingir a temperatura de 22°C. Sabendo o tempo após o evento de flexibilidade que cada zona demora a atingir a os 22°C, calculou-se o consumo de energia do cenário do evento de flexibilidade e de referência.

Para avaliar o impacto no consumo de energia do edifício fez-se a diferença entre consumo de energia dedicado a climatização do cenário de referência e o consumo de energia dedicado a climatização do cenário do evento de flexibilidade. Adicionalmente, o impacto dos eventos de flexibilidade no conforto térmico dos ocupantes foi avaliado tendo em conta o RECS (Regulamento de Desempenho Energético

dos Edifícios de Comércio e Serviços), que considera uma temperatura de conforto interior entre os 20°C e 25°C inclusive² [48].

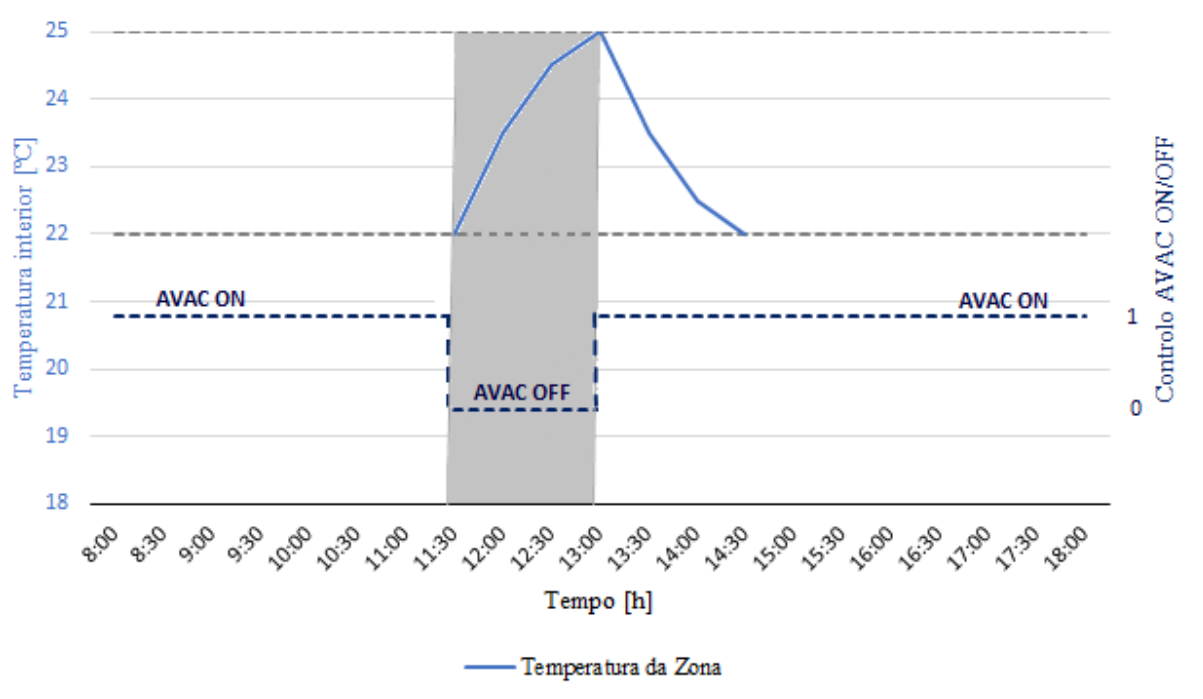


Figura 5: Controlo AVAC para um evento de flexibilidade

² n.º 3.2, Tabela I.04 do Anexo I da Portaria n.º17-A/2016, de 4 de fevereiro na sua redação atual.

Capítulo V - Resultados.

Este capítulo está reservado à análise e discussão dos resultados obtidos no desenvolvimento desta dissertação. A primeira secção aborda a caracterização da variabilidade da nebulosidade, para tal, é feita uma análise estatística dos períodos de nuvem relativamente à temperatura máxima diária compreendida entre 15°C a 30°C. Este intervalo de temperatura representa dias que poderá existir arrefecimento, sem que essa temperatura seja extremamente elevada. A segunda secção, está dedicado à análise do consumo de energia dedicado a climatização do escritório e conforto térmico dos ocupantes.

5.1. Caracterização de Períodos Nebulosidade

A Figura 6, mostra a divisão de dias com céu limpo, dias de céu nublado e céu intermediário, e dias com períodos de nebulosidades para o estado de Oregon. Nos 3 anos analisados, 17% dos dias são de céu limpo (K_T superior a 0.6), 55% dos dias são dias de céu nublado e céu intermediário (K_T inferior a 0.6), e 28% dos dias são dias com períodos de nebulosidade aceitáveis (períodos de nuvem iguais ou superiores a 5 minutos).

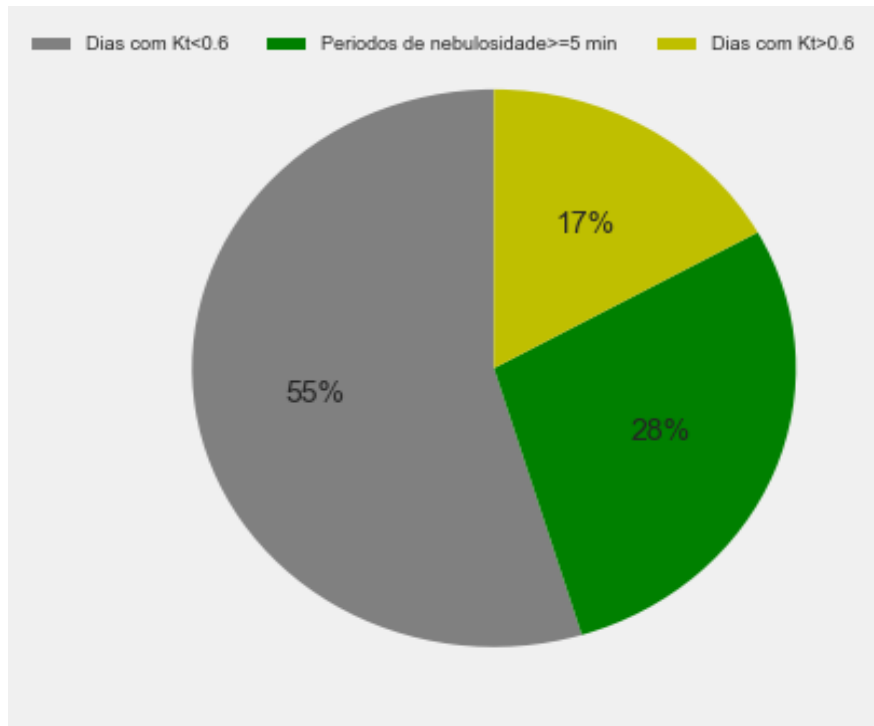


Figura 6: Caracterização da condição do céu em Oregon

Partindo dos resultados obtidos na Figura 6, fez-se uma divisão dos dias com períodos de nebulosidade de acordo com a temperatura máxima diária, estando os resultados representados na Figura 7. Quase metade dos 28% dos dias com períodos de nebulosidade encontram-se nos dias com temperatura máxima compreendida entre 15-30°C. Nota-se ainda que a ocorrência de períodos de nebulosidade é mais frequente nos dias com temperatura máxima entre 15-25°C, com maior frequência em dias com temperatura máxima igual a 20°C e menor frequência em dias com temperatura máxima igual a 30°C.

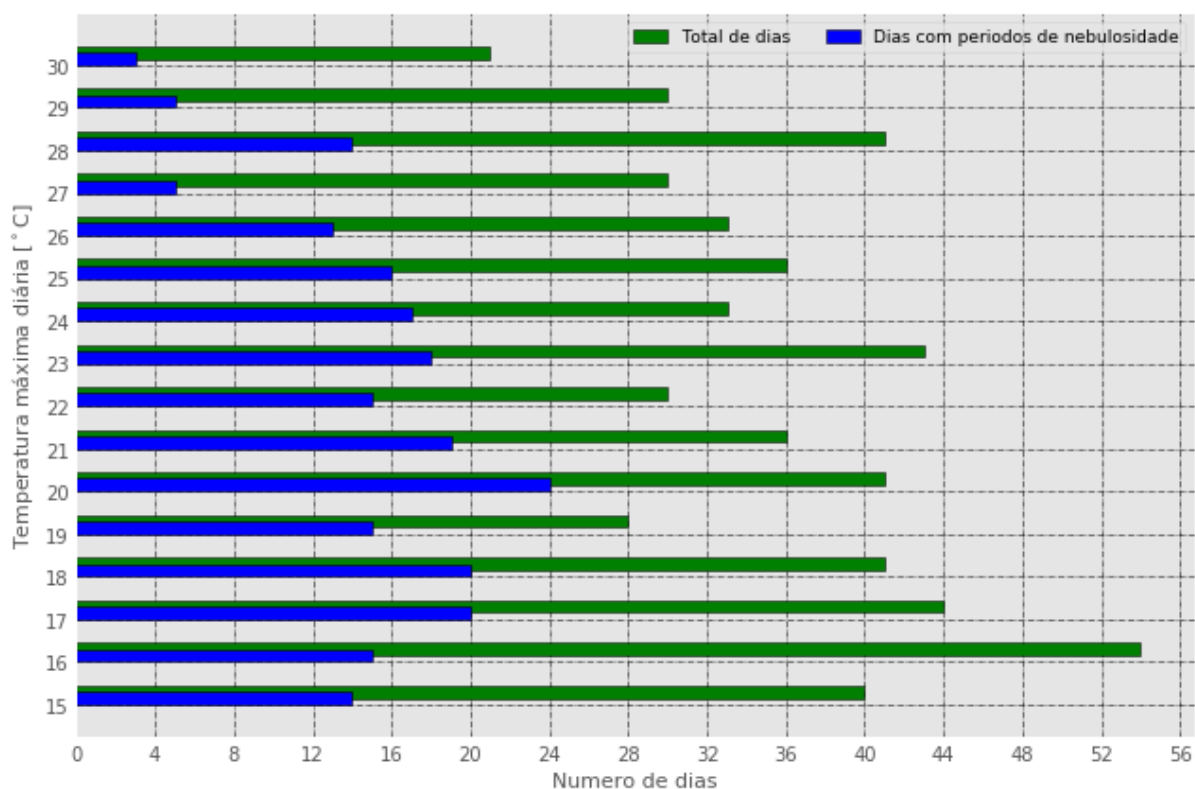


Figura 7: Caraterização dos períodos de nebulosidade em função de Tmax diário.

A Figura 8, apresenta histogramas com a duração dos períodos de nebulosidade para dias com a mesma temperatura máxima diária. Nota-se que a maioria dos eventos de nebulosidade tem um período de tempo até 20 minutos.

Não é possível verificar uma correlação do tempo dos períodos de nuvem com a temperatura máxima diária, pois não existe uma relação clara entre o aumento da temperatura máxima e o tempo dos períodos de nuvem, assim, por este motivo, existirá sempre uma variabilidade temporal dos períodos de nuvens independentemente da temperatura máxima diária.

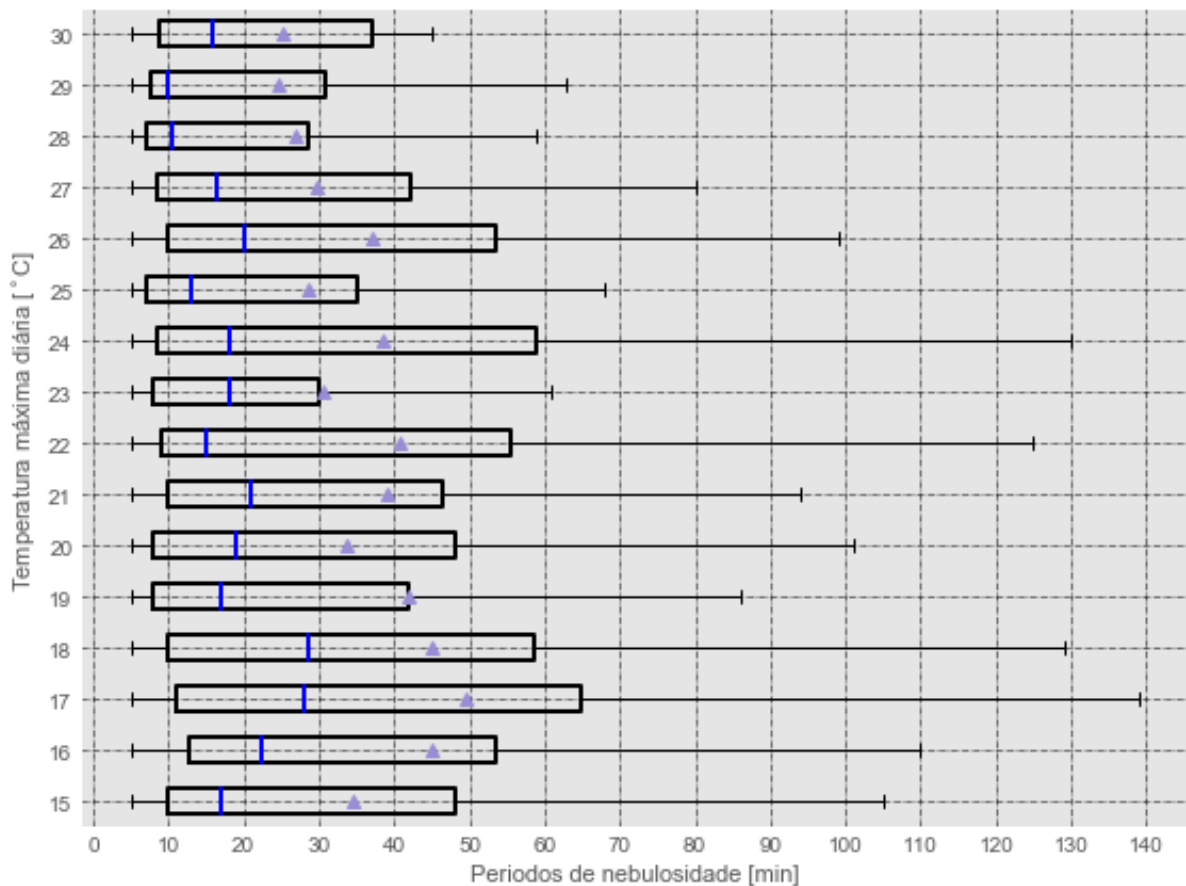


Figura 8: Duração dos períodos de nebulosidade em função de Tmax diária.

Com os resultados obtidos, é possível verificar que períodos de nuvem mais frequentes encontram-se na faixa dos 5-20 minutos. Existe uma tendência de maior quantidade de períodos de nebulosidade em dias com temperatura máxima inferior a 25°C, e uma tendência para uma redução da quantidade de períodos de nuvem em dias com temperatura máxima superiores a 25°C. Dias com temperaturas superiores a 25°C a variabilidade da duração e o número de períodos de nuvens tende a diminuir, contudo não é possível afirmar que a duração do período de nebulosidade é dependente da temperatura, uma vez que não existe uma correlação evidente entre a duração do período de nebulosidade e a temperatura máxima diária.

Outro aspecto a ter em conta, é, os resultados obtidos para a região de Oregon não podem ser extrapolados para outras regiões, sendo primordial uma análise singular de região para região, devido à variabilidade climática.

5.2. Avaliação do Consumo de Energia e Conforto Térmico

Esta secção recai sobre a análise dos resultados obtidos da simulação dinâmica dos eventos de flexibilidade. É analisado o impacto da nebulosidade nos ganhos solares comparativamente aos ganhos internos, bem como o consumo de energia e o conforto térmico. Para analisar o consumo de energia e o conforto térmico, três cenários de análise foram criados. O primeiro cenário representa a constituição original do escritório com uma massa térmica interna leve (*capacity multiplier* de 6), o segundo cenário representa o escritório com uma massa térmica interna típica (*capacity multiplier* de 10), e o terceiro cenário representa o escritório com uma massa térmica interna pesada (*capacity multiplier* de 15).

5.2.1. Ganho Interno e Ganho Solar

A Figura 9, representa o quanto superior é o ganho interno em relação ao ganho solar durante o período de nebulosidade. Em média o ganho interno é 19 vezes superior ao ganho solar durante o período de nebulosidade. Assim, durante o período de nebulosidade verifica-se que os ganhos internos do edifício são os principais impulsionadores do ganho de calor no interior do edifício, influenciando desta forma o conforto térmico dos ocupantes.

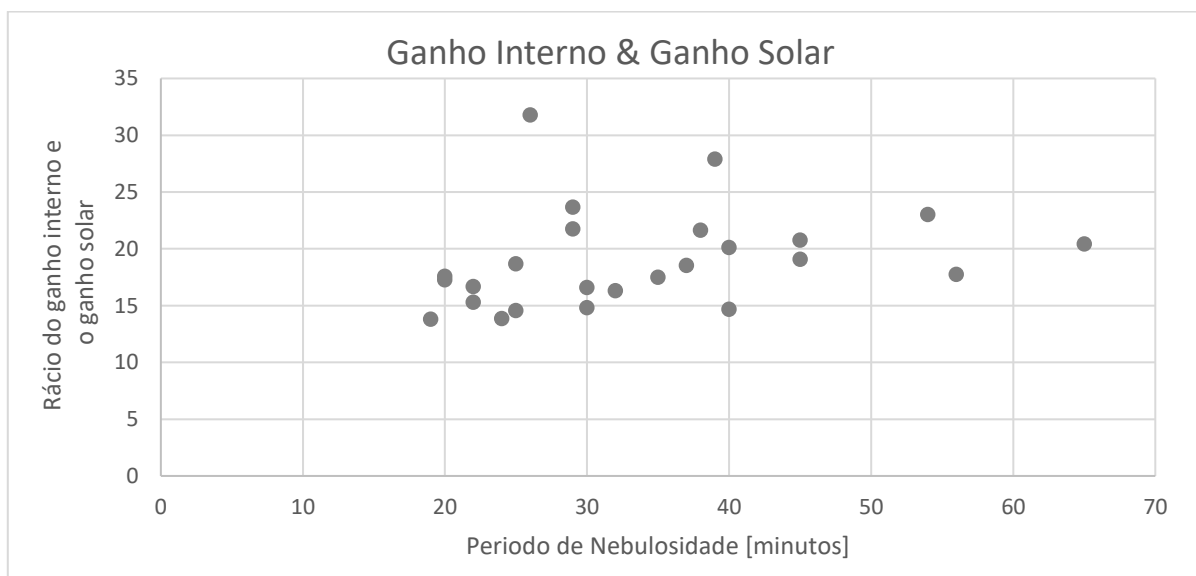


Figura 9: Rácio entre o ganho interno e o ganho solar para cada evento de flexibilidade

5.2.2. Cenário 1 - Escritório com uma massa térmica interna leve

Na Tabela 4, estão representados os resultados para cada evento de flexibilidade, obtidos na simulação dinâmica do edifício a massa térmica original do edifício (*capacity multiplier* de 6, correspondente a massa térmica leve).

A temperatura média exterior durante o evento de flexibilidade é representada por \bar{T}_{out} , e $\bar{\Delta T}_{in}$ representa a variação média da temperatura interior nas quatro zonas durante o período de nebulosidade. O resultado da variação média do tempo pós período de nebulosidade ($\bar{t}_{pos\ nuvem}$) representa a média do tempo que demora cada divisão a atingir a temperatura set-point de arrefecimento (22°C). Todas as figuras obtidas neste cenário podem ser consultadas no Anexo A.

A Figura 10, representa a simulação dinâmica de um evento de flexibilidade no dia 15 de agosto. É possível verificar nesta figura a variação da temperatura interior de cada zona durante o evento de flexibilidade.

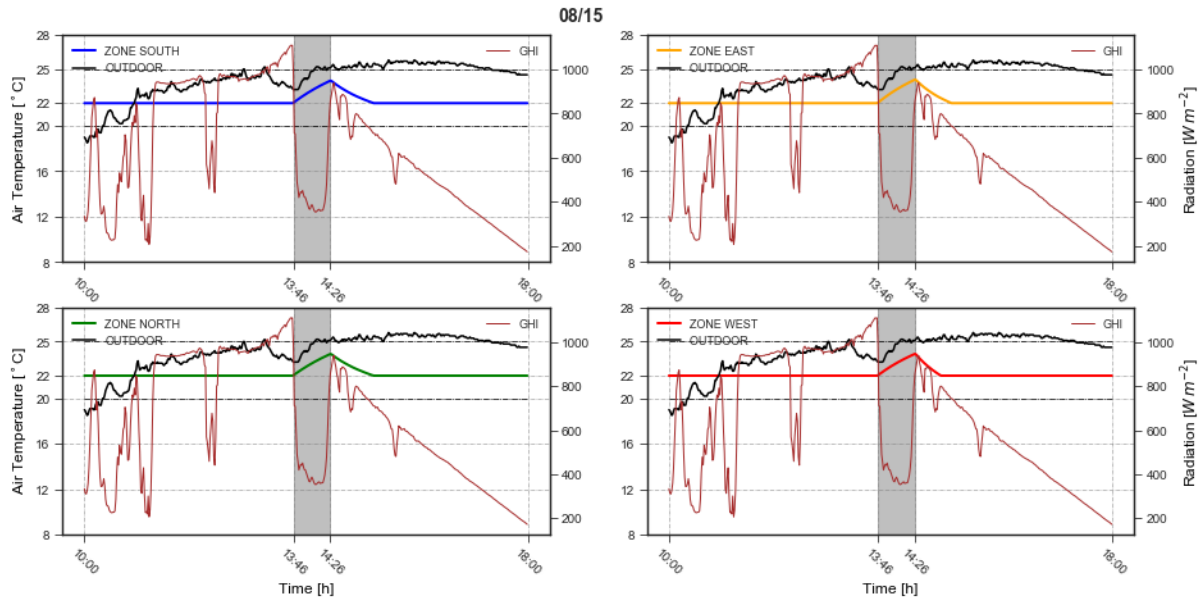


Figura 10: Simulação dinâmica de um evento flexibilidade dia 15 de agosto, cenário 1.

Tabela 4: Resultados simulação escritório massa térmica interna leve

Data início período de nuvem	\bar{T}_{out} [°C]	Período de nuvem [minutos]	$\overline{\Delta T}_{in}$ [°C]	$\bar{t}_{pos\ nuvem}$ [minutos]	Redução do consumo de energia	
					[kWh]	[Wh/m ²]
25-Jun 12:54	21.2	19	1.0	21.3	1.1	5.2
2-Jul 14:22	20.7	20	0.9	11.0	1.1	5.0
13-Sep 14:10	19.2	20	1.4	41.8	1.4	6.1
7-Apr 11:15	14.8	22	1.2	24.5	1.3	6.3
16-Jul 13:51	25.5	22	1.4	63.8	1.8	7.8
15-Sep 12:09	19.0	24	1.6	48.8	1.7	7.7
18-Sep 13:40	16.8	25	1.6	36.3	1.6	7.5
20-May 11:57	15.3	25	0.8	11.8	1.3	6.0
20-Apr 13:13	12.6	26	1.3	26.3	1.4	6.3
21-Mar 11:28	14.7	29	1.1	25.5	1.5	7.1
7-Jun 13:27	13.9	29	1.8	37.3	1.7	7.7
20-Sep 11:58	16.9	30	1.8	37.8	2.0	9.1
24-Sep 13:36	23.8	30	1.3	45.3	1.9	8.5
11-Sep 12:56	21.0	32	2.2	60.8	2.6	11.7
19-Sep 11:50	15.9	35	2.0	41.0	2.2	10.3
21-May 13:49	13.9	37	0.9	15.3	2.2	9.3
10-May 11:10	13.1	38	2.1	44.8	2.2	10.1
27-Mar 11:55	10.9	39	1.4	22.0	1.9	8.8
15-Aug 13:46	24.4	40	2.0	38.8	2.9	13.4
27-Jun 13:22	16.8	40	2.4	61.8	2.8	12.7
17-May 11:48	15.2	45	2.3	38.5	2.9	13.3
28-Sep 11:28	11.9	45	2.5	40.3	2.9	15.7
27-Apr 11:42	11.3	54	2.2	41.3	2.9	13.5
6-Jun 12:07	15.4	56	3.3	59.8	4.1	18.6
4-Oct 11:41	14.5	65	2.8	66.8	3.2	12.9

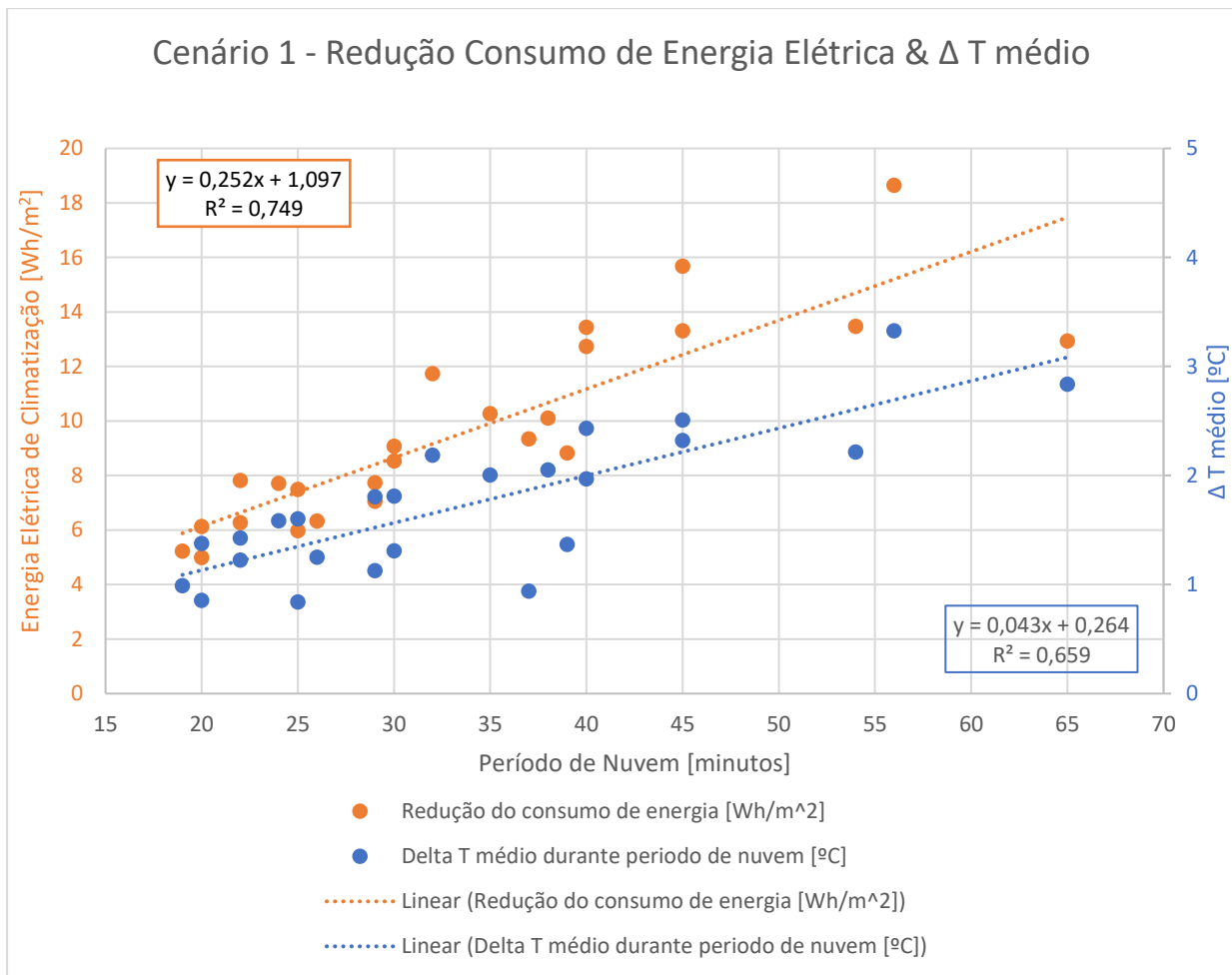


Figura 11: Redução consumo de energia e variação média da temperatura interior, massa térmica interna leve

A Figura 11, mostra que existe uma correlação entre a duração do período de nuvem com a redução de energia, e com a variação média da temperatura interior das quatro zonas. Através da reta de regressão linear, nota-se que as observações na reta de redução do consumo de energia estão mais próximo da reta, enquanto as observações da reta da variação média da temperatura interior encontram-se um pouco mais afastado da mesma.

A partir das equações das retas de regressão é possível prever a redução do consumo de energia e a variação média da temperatura interior do edifício. Através das retas de regressão representados na Figura 12, consegue-se verificar a partir de que ponto deixa de ser confortável e quanto será a redução máxima de energia correspondente. Assim, considerando uma variação média de temperatura interior inferior ou igual a 3°C, verifica-se que períodos de nebulosidade com uma duração superior a 60 minutos não são termicamente viáveis, pois, segundo o RECS ultrapassa-se a temperatura de conforto dos ocupantes (compreendida entre 20°C e 25°C) [48].

Para evitar esse aumento de temperatura nos períodos de nuvem com duração superior a 60 minutos, uma sugestão, passará pela utilização da ventilação natural (abertura das janelas), sempre que as condições ambientais exteriores permitirem. Dessa forma, aumenta-se o fluxo de ar no interior e consequentemente reduz-se a temperatura interior, assim é possível manter o AVAC OFF por mais algum tempo.

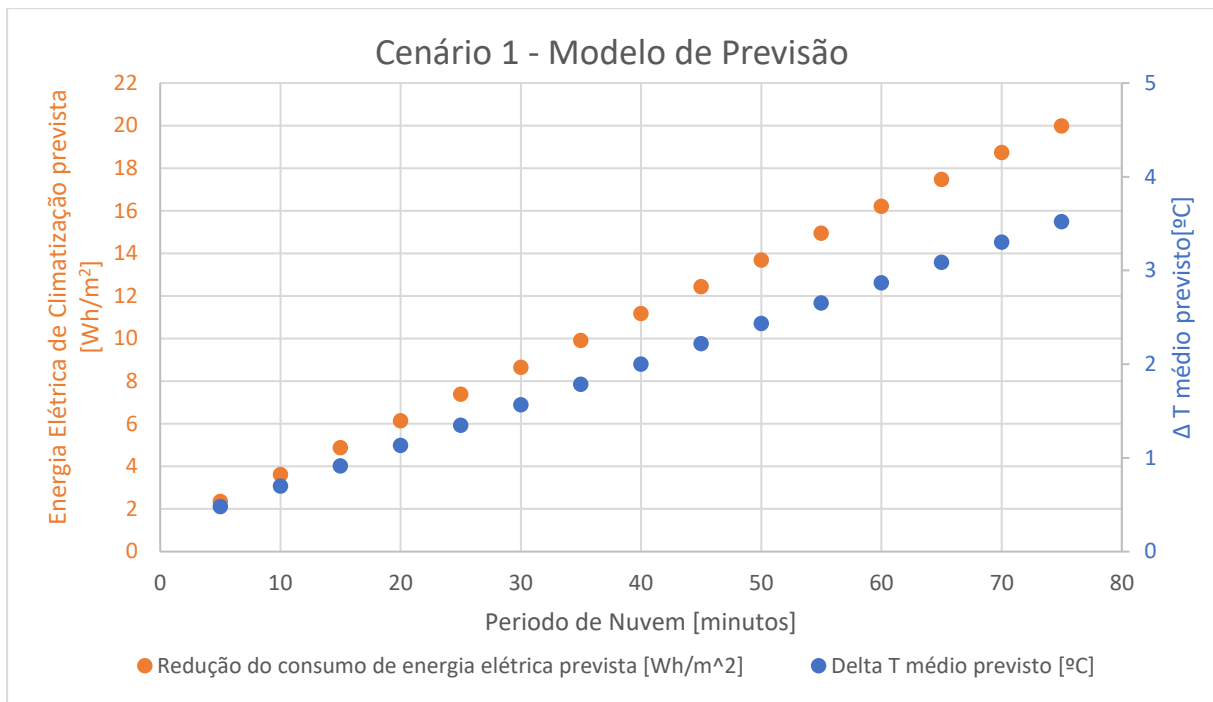


Figura 12: Previsão da redução do consumo de energia e variação média da temperatura interior, massa térmica interna leve

5.2.3. Cenário 2 - Escritório com uma massa térmica interna típica.

Os resultados na Tabela 5 representam a simulação do edifício utilizando um *capacity multiplier* de 10. Nota-se na Figura 13, que a variação média do tempo para a zona voltar aos 22°C, sofre um ligeiro aumento em comparação com o cenário 1. Nota-se também uma redução significativa da temperatura interior de cada zona durante o período de nebulosidade.

As figuras com as curvas de temperatura interior de cada zona para cada evento de flexibilidade podem ser consultadas no Anexo B.

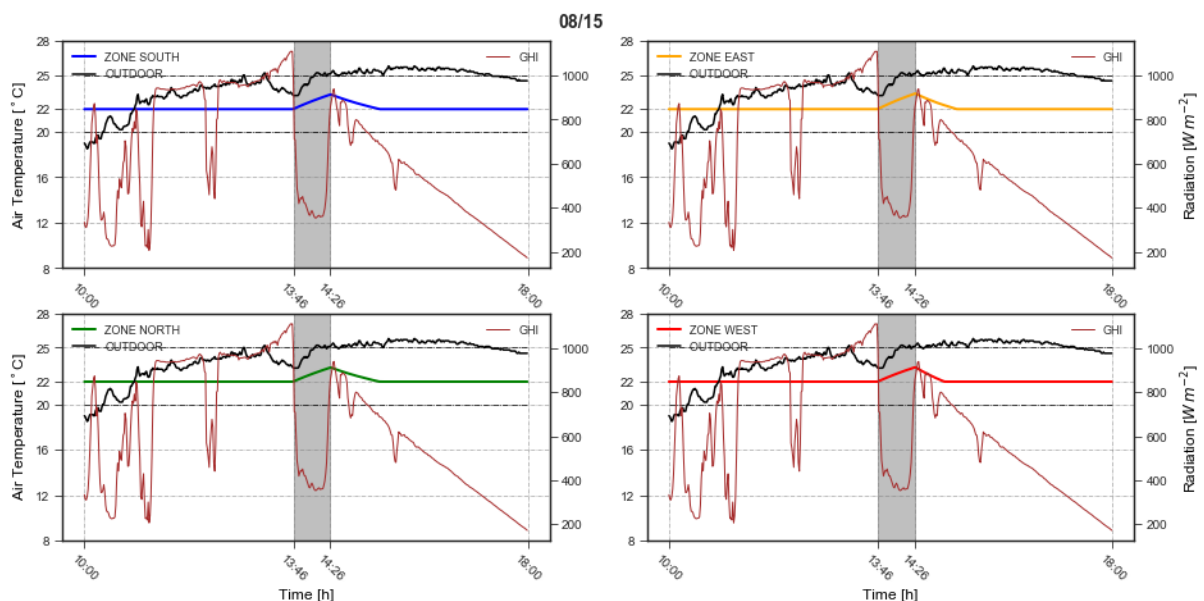


Figura 13: Simulação dinâmica de um evento flexibilidade dia 15 de agosto, cenário 2.

Tabela 5: Resultados simulação escritório massa térmica interna de um escritório típico

Data início período de nuvem	\bar{T}_{out} [°C]	Período de nuvem [minutos]	$\overline{\Delta T}_{in}$ [°C]	$\bar{t}_{pos\ nuvem}$ [minutos]	Redução do consumo de energia	
					[kWh]	[Wh/m ²]
25-Jun 12:54	21.2	19	0.6	22.3	1.0	4.7
2-Jul 14:22	20.7	20	0.5	11.3	1.0	4.6
13-Sep 14:10	19.2	20	0.9	46.0	1.2	5.4
7-Apr 11:15	14.8	22	0.8	27.3	1.2	5.7
16-Jul 13:51	25.5	22	0.9	71.0	1.5	6.7
15-Sep 12:09	19.0	24	1.0	55.0	1.5	6.8
18-Sep 13:40	16.8	25	1.0	41.0	1.4	6.5
20-May 11:57	15.3	25	0.5	12.3	1.2	5.6
20-Apr 13:13	12.6	26	0.8	29.3	1.2	5.8
21-Mar 11:28	14.7	29	0.7	28.3	1.4	6.6
7-Jun 13:27	13.9	29	1.2	42.3	1.5	6.7
20-Sep 11:58	16.9	30	1.2	42.8	1.7	8.0
24-Sep 13:36	23.8	30	0.8	50.0	1.6	7.4
11-Sep 12:56	21.0	32	1.4	69.3	2.3	10.2
19-Sep 11:50	15.9	35	1.3	47.0	2.0	9.0
21-May 13:49	13.9	37	0.6	16.5	2.1	8.9
10-May 11:10	13.1	38	1.3	51.0	1.9	8.9
27-Mar 11:55	10.9	39	0.9	24.5	1.8	8.2
15-Aug 13:46	24.4	40	1.3	44.8	2.5	11.7
27-Jun 13:22	16.8	40	1.6	71.0	2.5	11.1
17-May 11:48	15.2	45	1.5	44.3	2.6	11.9
28-Sep 11:28	11.9	45	1.6	46.5	2.6	14.2
27-Apr 11:42	11.3	54	1.5	48.0	2.6	12.2
6-Jun 12:07	15.4	56	2.2	70.8	3.6	16.2
4-Oct 11:41	14.5	65	1.9	80.5	2.7	11.0

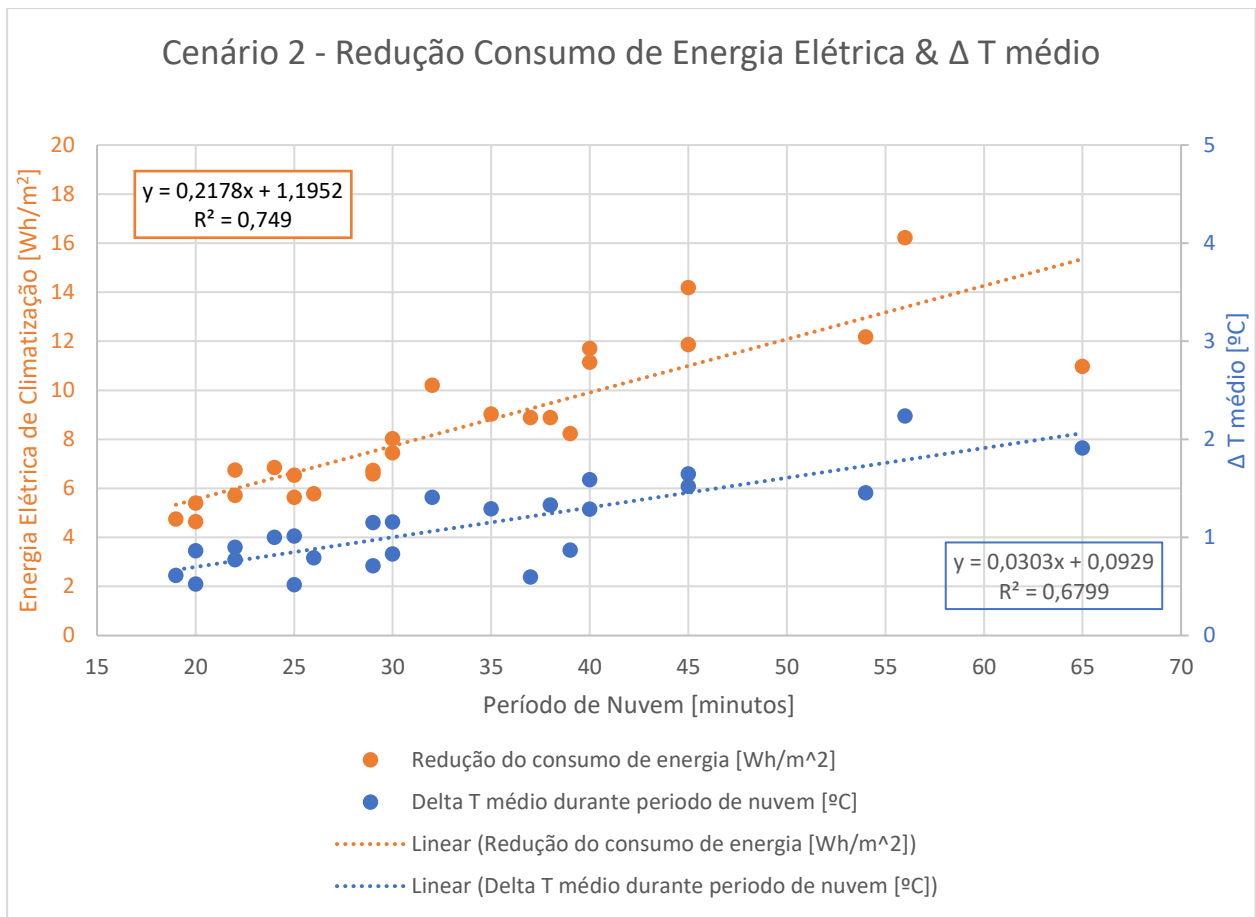


Figura 14: Redução consumo de energia e variação média da temperatura interior, massa térmica interna de um escritório típico

Os resultados da Figura 14, demonstram a aproximação das observações com a reta de regressão, com uma correlação maior quando comparado com o cenário 1. uma correlação fracamente positiva quando comparado com o cenário 1. Porém, é notória uma redução significativa da variação média da temperatura interior, e um ligeiro aumento do consumo de energia elétrica dedicado a climatização. Não obstante, essa redução da variação média da temperatura interior traduz-se num aumento do intervalo de utilização de períodos de nebulosidade sem comprometer o conforto térmico. Para tal, a variação média da temperatura interior representado na Figura 15 deve ser inferior ou igual a 3°C, de modo que a temperatura de conforto térmico dos ocupantes não ultrapasse os 25°C.

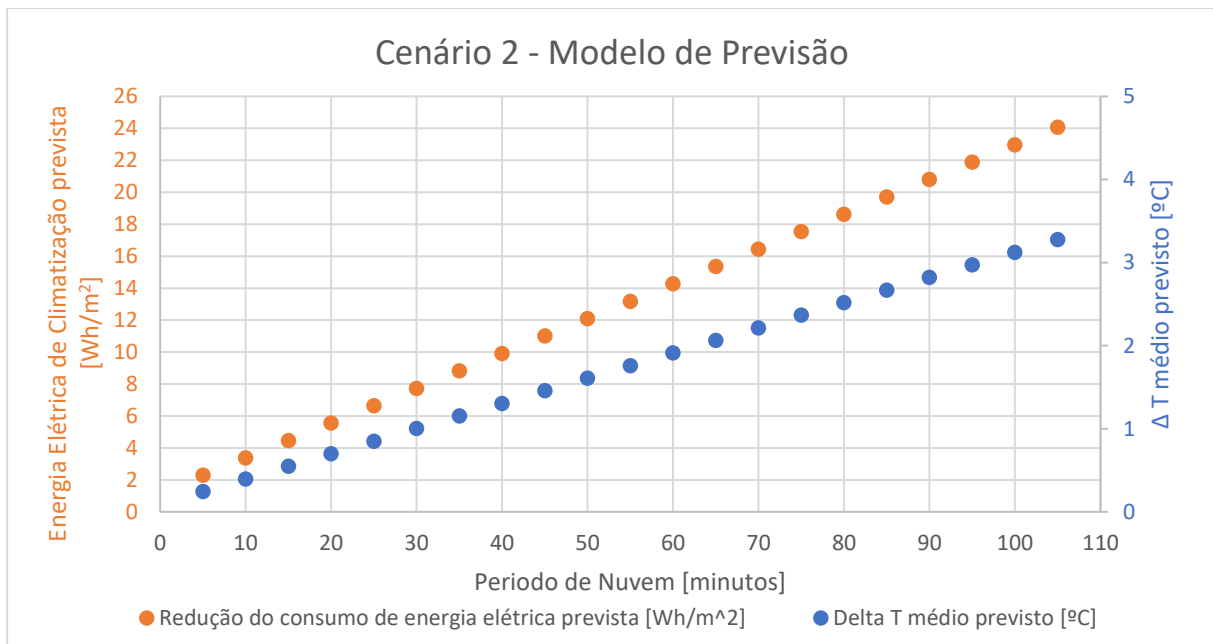


Figura 15: Previsão da redução do consumo de energia e variação média da temperatura interior, massa térmica interna de escritório típico

5.2.4. Cenário 3 - Escritório com uma massa térmica interna pesada.

Neste cenário para modificar a massa térmica interna do escritório, utilizou-se um *capacity multiplier* de 15. A Figura 16, demonstra que o aumento da massa térmica interna do escritório faz com que a temperatura interior aumente menos, quando comparado com o cenário 1 e cenário 2. Contudo, a zona demora mais tempo a atingir a temperatura set-point de arrefecimento (22°C) após o período de nuvem. Os resultados desta análise estão quantificados na Tabela 6, e todas as figuras obtidas neste cenário podem ser consultadas no Anexo C.

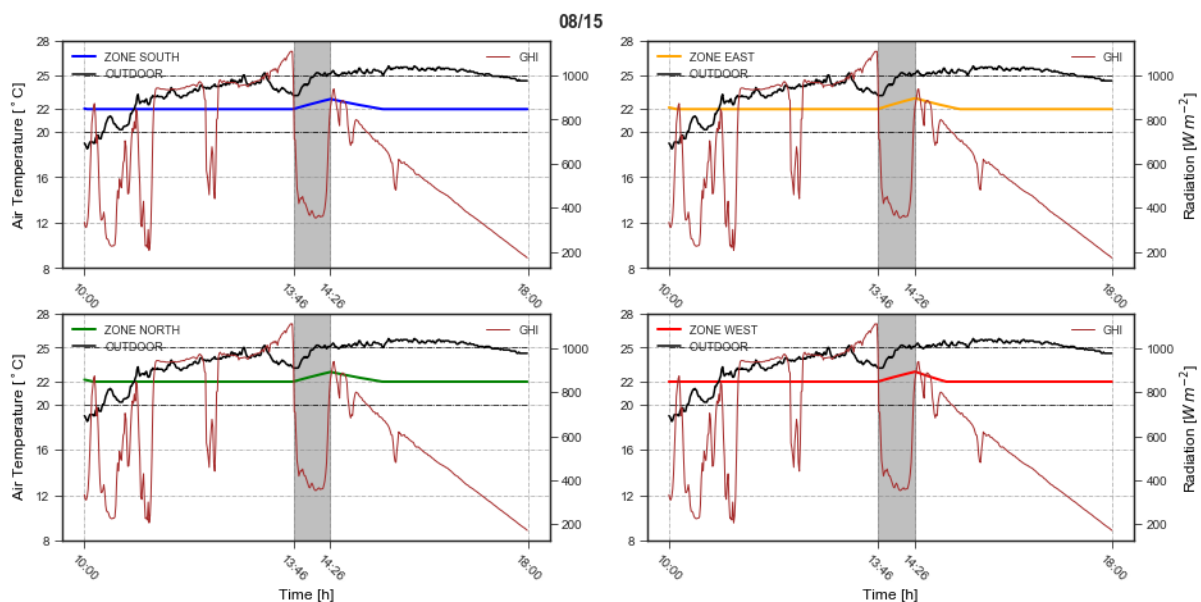


Figura 16: Simulação dinâmica de um evento flexibilidade dia 15 de agosto, cenário 3.

Tabela 6: Resultados simulação escritório com uma massa térmica interna pesada

Data início período de nuvem	\bar{T}_{out} [°C]	Período de nuvem [minutos]	$\overline{\Delta T}_{in}$ [°C]	$\bar{t}_{pos\ nuvem}$ [minutos]	Redução do consumo de energia	
					[kWh]	[Wh/m ²]
25-Jun 12:54	21.2	19	0.4	22.8	0.9	4.3
2-Jul 14:22	20.7	20	0.3	10.8	1.0	4.6
13-Sep 14:10	19.2	20	0.6	47.8	1.1	4.8
7-Apr 11:15	14.8	22	0.5	28.3	1.2	5.4
16-Jul 13:51	25.5	22	0.6	74.5	1.3	6.0
15-Sep 12:09	19.0	24	0.7	57.3	1.3	6.2
18-Sep 13:40	16.8	25	0.7	42.8	1.3	6.0
20-May 11:57	15.3	25	0.3	12.3	1.1	5.4
20-Apr 13:13	12.6	26	0.5	30.8	1.2	5.4
21-Mar 11:28	14.7	29	0.5	29.3	1.4	6.3
7-Jun 13:27	13.9	29	0.8	44.0	1.3	6.1
20-Sep 11:58	16.9	30	0.8	45.0	1.6	7.3
24-Sep 13:36	23.8	30	0.6	51.5	1.5	6.7
11-Sep 12:56	21.0	32	1.0	73.5	2.0	9.1
19-Sep 11:50	15.9	35	0.9	49.5	1.8	8.2
21-May 13:49	13.9	37	0.4	17.3	2.0	8.6
10-May 11:10	13.1	38	0.9	54.0	1.8	8.1
27-Mar 11:55	10.9	39	0.6	26.0	1.7	7.9
15-Aug 13:46	24.4	40	0.9	47.3	2.3	10.7
27-Jun 13:22	16.8	40	1.1	76.5	2.2	9.9
17-May 11:48	15.2	45	1.1	47.3	2.4	10.9
28-Sep 11:28	11.9	45	1.1	49.8	2.4	13.2
27-Apr 11:42	11.3	54	1.0	51.3	2.4	11.4
6-Jun 12:07	15.4	56	1.6	77.0	3.2	14.6
4-Oct 11:41	14.5	65	1.4	90.0	2.4	9.6

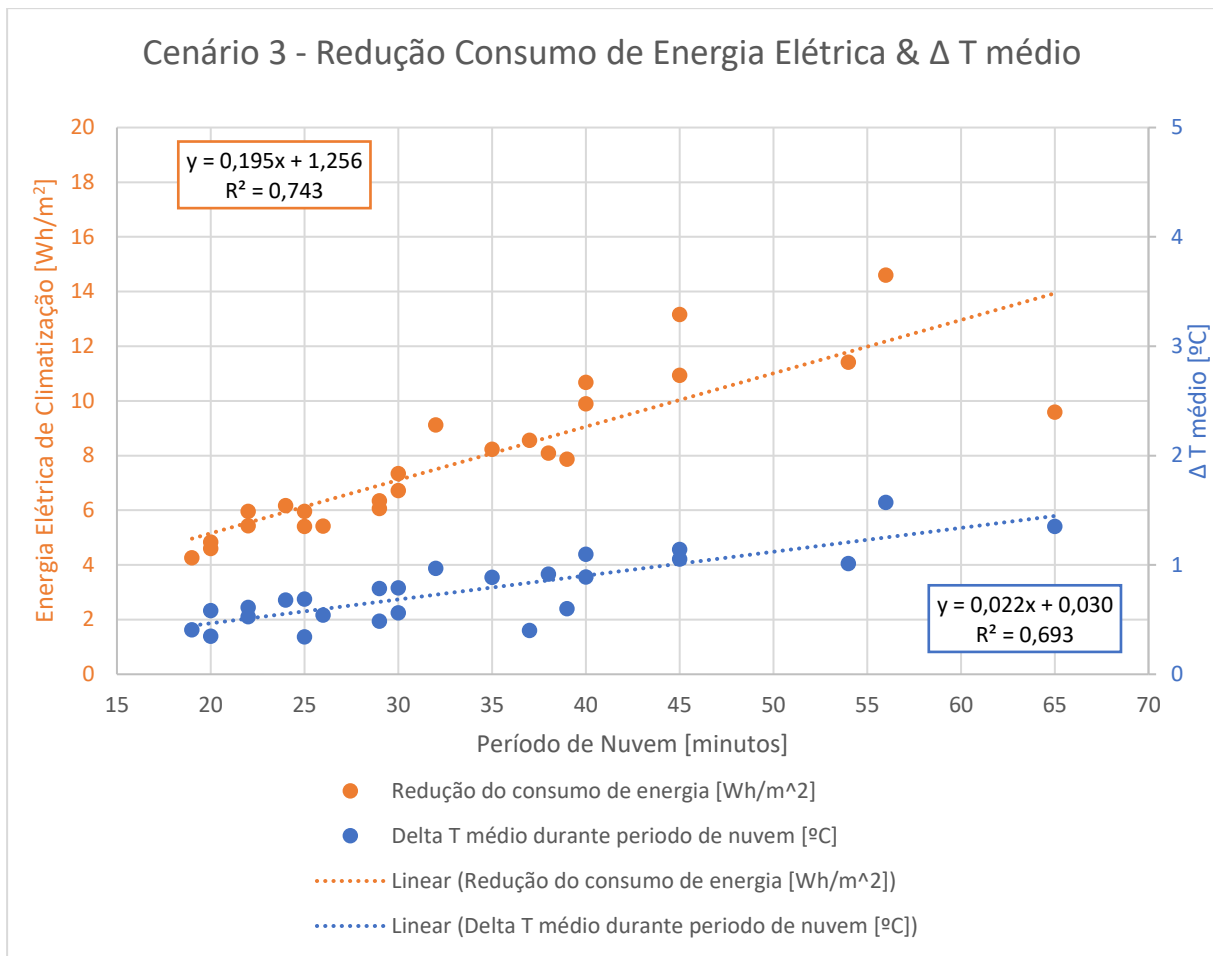


Figura 17: Redução consumo de energia e variação média da temperatura interior, massa térmica interna pesada.

A Figura 17, demonstra mais uma vez, que a redução do consumo de energia e variação média da temperatura interior está correlacionado com o aumento do período de nebulosidade. No entanto, a redução do consumo de energia e a variação média da temperatura interior diminuem face aos dois cenários anteriores. Nota-se pelas retas de regressão representadas na Figura 18, que é possível aproveitar períodos de nebulosidade com uma duração máxima de 135 minutos sem comprometer o conforto térmico dos ocupantes.

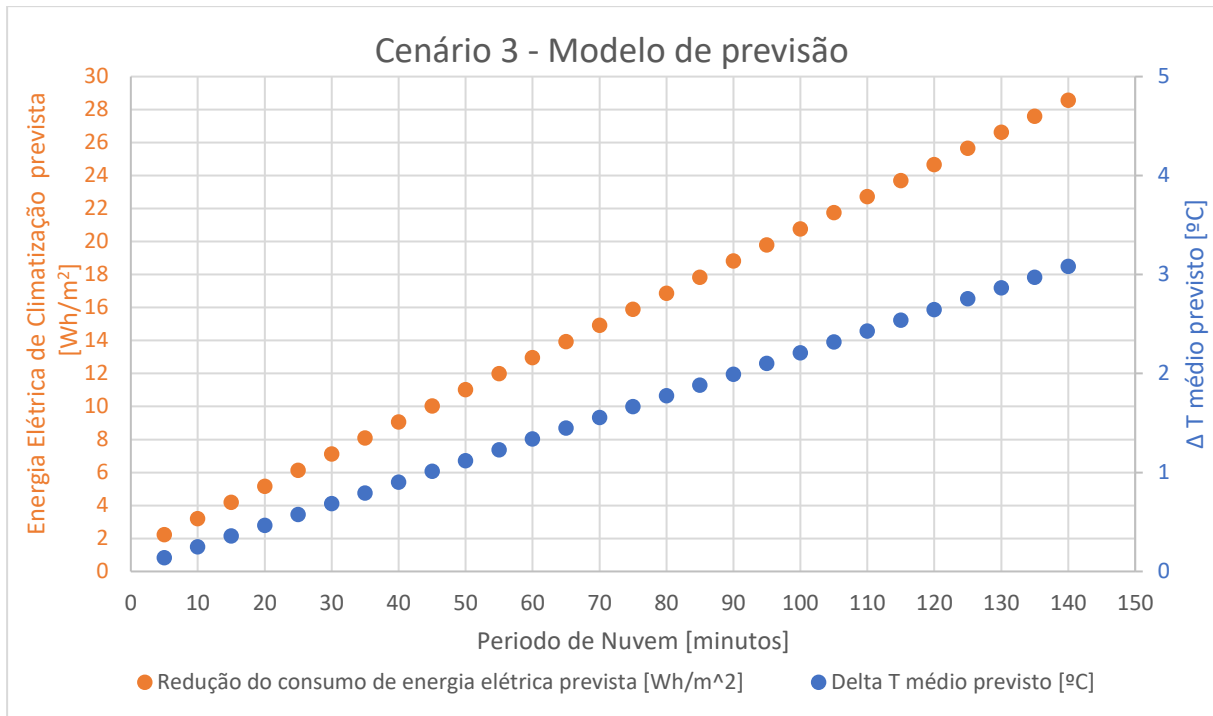


Figura 18: Previsão da redução do consumo de energia e variação média da temperatura interior, massa térmica interna pesada

5.2.5. Comparação dos Cenários

A Figura 19 representa a variação média da temperatura interior durante o período de nebulosidade em função da temperatura média exterior. Tendo em conta os resultados obtidos nos três cenários simulados, verifica-se que não existe correlação entre a temperatura média exterior e a variação média da temperatura interior durante o evento de flexibilidade. Verifica-se também, que no cenário 3 a variação da temperatura média interior é inferior em relação ao cenário 1 e cenário 2. Porém, a temperatura exterior não pode ser utilizada como um parâmetro de análise da variação da temperatura no interior do edifício.

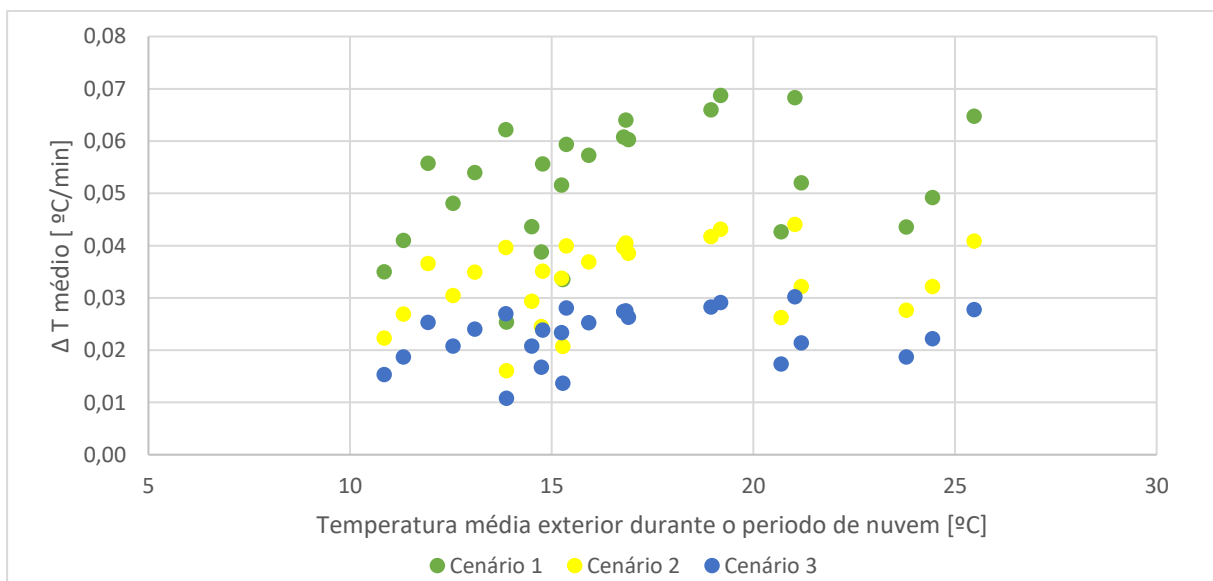


Figura 19: Variação da temperatura média interior durante período de nebulosidade nos três cenários em função da temperatura média exterior

A Figura 20, demonstra uma comparação da variação da temperatura interior da zona sul durante um evento de flexibilidade (entre as 13h46 e 14h26 do dia 15 de agosto) para os três cenários. O primeiro cenário (*capacity multiplier* de 6) apresenta um rápido aumento da variação média da temperatura interior. No segundo cenário (*capacity multiplier* de 10) e o terceiro cenário (*capacity multiplier* de 15) a temperatura interior aumenta menos, no entanto há um ligeiro aumento do tempo que a zona demora a voltar a atingir os 22°C. É notório pelos resultados obtidos, o impacto do aumento da massa térmica na redução do pico da temperatura interior durante o evento de flexibilidade.

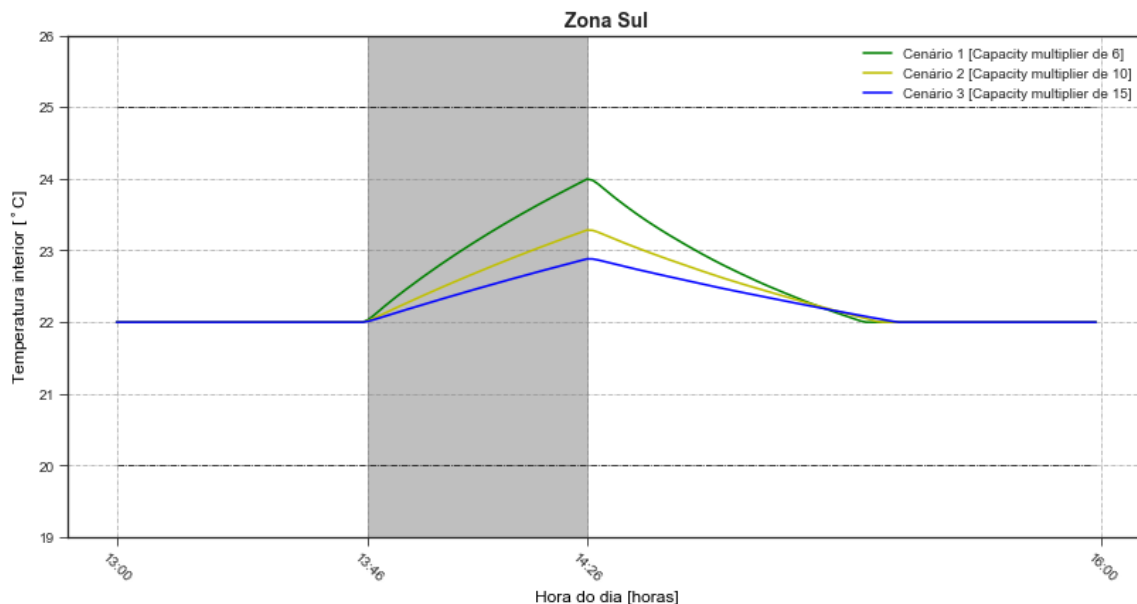


Figura 20: Impacto da massa térmica interna dos 3 cenários, zona sul dia 15 de agosto

A Figura 21, mostra a comparação entre os diferentes cenários referentes à poupança de energia máxima e ao período de nebulosidade máximo que pode ser utilizado sem ultrapassar os 25°C e comprometer o conforto térmico dos ocupantes. A duração do período de nebulosidade que pode ser utilizado em eventos de flexibilidade passou de 60 minutos no cenário 1, para 95 minutos no cenário 2 e 135 minutos no cenário 3, com uma redução máxima de energia elétrica dedicado a climatização de 16.2 Wh/m², 21.9 Wh/m², e 27.6 Wh/m² respetivamente.

Os resultados mostram o impacto da massa térmica interna no consumo de energia e na variação da temperatura interior durante um evento de flexibilidade. O cenário 3 e o cenário 2, devido à capacidade de armazenar mais calor na massa térmica interna, possibilitam um maior tempo de AVAC OFF (permite utilizar períodos de nebulosidade com uma maior duração). Porém, se o período de nebulosidade tiver uma duração de 60 minutos o cenário 1 permite uma maior poupança de energia sem comprometer o conforto térmico.

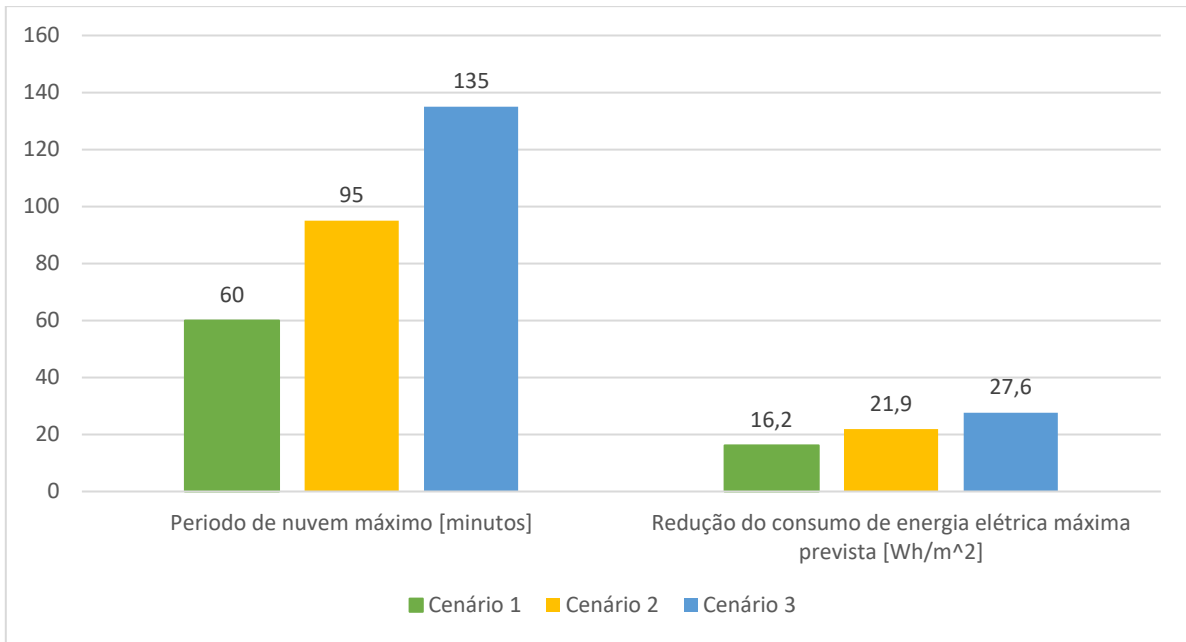


Figura 21: Comparação dos cenários - período de nuvem máximo e redução do consumo de energia máxima prevista.

Capítulo VI - Conclusão

O objetivo desta dissertação é verificar e analisar o impacto da utilização de períodos de nebulosidade no consumo de energia e no conforto térmico, aliado a períodos de flexibilidade do consumo de energia em edifícios. Para tal, foram classificados e caracterizados os períodos de nebulosidade da uma estação meteorológica situada na região de Oregon, através da utilização de três anos de irradiação solar global horizontal (GHI). Para caracterizar as condições do céu de Oregon, dividiu-se os dias em três tipos de dias (limpo, nublado e dias com períodos de nebulosidade) com base no índice de claridade, K_T . Os resultados obtidos mostram que 17% dos dias correspondem a dias de céu limpo, 55% correspondem a dias de céu nublado (K_T sempre inferior a 0.6), e 28% correspondem a dias com períodos de nebulosidade com duração superior ou igual a 5 minutos intercalados com períodos de céu limpo. Dos 28% dos dias correspondentes a dias com períodos de nebulosidade, cerca de metade desses dias são dias com temperatura máxima entre os 15-30°C, portanto dias que pode ser necessário algum consumo de energia elétrica dedicado ao arrefecimento.

Posteriormente à fase de identificação e classificação dos períodos de nebulosidade, iniciou-se a criação de vários ficheiros de simulação dinâmica, onde cada ficheiro representava um evento de flexibilidade. Para analisar os eventos de flexibilidade causados por períodos de nebulosidade, recorreu-se ao *EnergyPlus*, com a utilização de um modelo de simulação dinâmica de um escritório de dimensão média. Esta análise incluía o consumo de energia dedicado a climatização e conforto térmico dos ocupantes. Para tal, criou-se três cenários baseados na variação da massa térmica interna do edifício. O primeiro cenário corresponde a um edifício com massa térmica interna leve, o segundo corresponde a um edifício com massa térmica interna típica, e o terceiro corresponde a um edifício com massa térmica interna pesada.

Os resultados obtidos desses três cenários, demonstram que é possível reduzir o consumo de energia dedicado a climatização de um edifício de serviço e comércio sem comprometer o conforto térmico dos ocupantes. Os resultados dos três cenários evidenciam uma correlação positiva entre a duração do período de nebulosidade e redução do consumo de energia, e duração do período de nebulosidade e a variação média da temperatura interior. Os resultados demonstram claramente que há um aumento da redução do consumo de energia e um aumento da variação média da temperatura interior à medida que há um aumento da duração dos períodos de nebulosidade.

Para analisar o conforto térmico dos ocupantes e prever a poupança máxima de energia para cada cenário, definiu-se segundo o RECS que a temperatura interior não poderia ultrapassar os 25°C. Assim, os resultados obtidos no primeiro cenário, demonstram que o conforto térmico dos ocupantes é comprometido com períodos de nebulosidade com duração superior a aproximadamente 60 minutos, sendo possível reduzir aproximadamente 16.2 Wh/m² de energia elétrica dedicado a climatização durante esse período de nebulosidade. No segundo cenário, o conforto térmico é comprometido com períodos de nebulosidade com duração superior a 95 minutos, conseguindo reduzir aproximadamente 21.9 Wh/m² de energia elétrica dedicado a climatização. O terceiro cenário apresenta o maior intervalo de utilização de períodos de nebulosidade, sendo possível reduzir aproximadamente 27.6 Wh/m² de energia elétrica dedicado a climatização sem comprometer o conforto térmico dos ocupantes, com períodos de nebulosidade com duração inferior ou igual a 135 minutos.

Por outro lado, quando se compara os períodos de nebulosidade mais frequentes de Oregon, com duração compreendida entre 5-20 minutos. Tendo a maioria dos eventos esta duração, quer dizer que a maioria dos períodos de nebulosidade podem ser utilizados para flexibilidade. Verifica-se que utilizando um período de nebulosidade com uma duração de aproximadamente 20 minutos, é possível reduzir no primeiro cenário aproximadamente 6.1 Wh/m² de energia elétrica dedicado a climatização, 5.6 Wh/m²

no segundo cenário, e 5.2 Wh/m² no terceiro cenário. Assim, para Oregon o primeiro e o segundo cenário são melhores, pois tendo em conta os períodos de nebulosidade mais frequentes consegue-se poupar mais energia sem comprometer o conforto térmico dos ocupantes, porém para outros climas estes resultados podem ser diferentes. Verifica-se também que o aumento da massa térmica interna permite ter uma menor variação da temperatura interior devido à sua capacidade de armazenar calor.

Conclui-se assim que a utilização de períodos de nebulosidade, pode servir em eventos de flexibilidade de energia em edifícios. Durante estes períodos de nebulosidade os sistemas AVAC podem ser desligados e dessa forma reduzir o consumo de energia sem comprometer o conforto térmico dos ocupantes. Assim, em edifícios que utilizam energia PV produzida localmente, no caso de um NZEB é possível flexibilizar o consumo de energia no período em que há pouca produção PV. Por outro lado, para uma região com uma péssima qualidade de ar exterior, é possível reduzir o consumo de energia sem a utilização da ventilação natural (abertura das janelas).

Como trabalho futuro, sugere-se a verificação do impacto de períodos de nebulosidade com a integração da produção renovável (PV), bem como analisar o impacto da utilização da ventilação natural durante e após o período de nebulosidade, de forma a verificar o impacto deste no consumo de energia elétrica dedicado a climatização do edifício e no tempo de utilização da mesma sem comprometer as condições de conforto térmico.

Referências Bibliográficas

- [1] P. Torcellini, S. Pless, M. Deru e D. Crawley, “Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition,” National Renewable Energy Laboratory and Department of Energy, US, 2006.
- [2] “European Commission,” Energy performance of buildings directive, [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/>.
- [3] “Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast),” Eur.Union, 2010.
- [4] F. Lu, Z. Yu, X. Yang e Y. Zou, “Energy flexibility analysis of office building using pre-cooling with structural thermal mass,” *Materials Science and Engineering*, vol. 609, 2019.
- [5] H. Johra, P. Heiselberg e J. L. Dréau, “Influence of envelope, structural thermal mass and indoor content on the building heating energy flexibility,” *Energy and Buildings*, vol. 183, pp. 325-339, 2019.
- [6] J. Vivian, U. Chiodarelli, G. Emmi e A. Zarrella, “A sensitivity analysis on the heating and cooling energy flexibility of residential buildings,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 52, 2020.
- [7] L. Wald, “Basics in solar radiation at earth surface - revised version,” *Centre Observation, Impacts, Énergie*, 2019.
- [8] R. Tapakis e A. Gharalambides, “Equipment and methodologies for cloud detection and classification: A Review,” *Solar Energy*, vol. 95, pp. 392-430, 2013.
- [9] P. Tzoumanikas, E. Nikitidou, A. Basis e A. Kazantzidis, “The effect of clouds on surface solar irradiance, based on data from an all-sky imaging system,” vol. 95, pp. 314-322, 2016.
- [10] L. Sun, X. Mi, J. Wei, J. Wang, X. Tian, H. Yu e P. Gan, “A cloud detection algorithm-generating method for remote sensing data at visible to short-wave infrared wavelengths,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 124, pp. 70-88, 2017.
- [11] C. Li, J. Ma, P. Yang e Z. Li, “Detection of cloud cover using dynamic thresholds and radiative transfer models from the polarization satellite image,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vols. %1 de %2222-223, pp. 196-214, 2019.
- [12] Baharuddin, S. S. Y. Lau e R. Rahim, “Daylight availability in Hong Kong: classification into three sky conditions,” *Architectural Science Review*, nº 53:4, pp. 396-407, 2010.
- [13] M. Larraneta, M. Reno, I. Lillo-Bravo e M. Silva-Pérez, “Identifying periods of clear sky direct normal irradiance,” *Renewable Energy*, vol. 113, pp. 756-763, 2017.
- [14] J. F. Orgill e K. G. T. Hollands, “Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface,” *Solar Energy*, vol. 19, nº 4, pp. 357-359, 1977.

- [15] F. Olmo, J. Vida, I. Foyo, Y. Castro-Diez e L. Alados-Arboledas, "Prediction of global irradiance on inclined surfaces from horizontal global irradiance," *Energy*, vol. 24, pp. 689-704, 1999.
- [16] M. Martinez-Chico, F. Batlles e J. Bosch, "Cloud classification in a Mediterranean location using radiation data and images," *Energy*, vol. 36, n° 7, pp. 4055-4062, 2011.
- [17] T. Muneer, M. S. Gul e J. Kubie, "Models for estimating solar radiation and illuminance from meteorological parameters," *J. Sol. Energy Eng*, vol. 122, pp. 146-153, 2000.
- [18] D. Reindl, W. Beckman e J. Duffie, "Diffuse fraction correlations," *Solar Energy*, vol. 45, pp. 1-7, 1990.
- [19] D. H.W.Li, C. C.S.Lau e J. C.Lam, "Overcast sky conditions and luminance distribution in Hong," *Building and Environment*, vol. 39, pp. 101-108, 2004.
- [20] M. J. Reno e C. W. Hansen, "Identification of periods of clear sky irradiance in time series of GHI measurements," *Renewable Energy*, vol. 90, pp. 520-531, 2016.
- [21] D. D'Agostino e L. Mazzarella, "What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions," *Journal of Building Engineering*, vol. 21, pp. 200-212, 2019.
- [22] J. S. Ramos, M. P. Moreno, M. G. Delagado, S. Á. Domínguez e L. F. Cabeza, "Potencial of energy flexible buildings: Evaluation of DSM strategies using building thermal mass," *Energy and Buildings*, vol. 203, p. 109442, 2019.
- [23] S. O. Jensen, A. Marszal-Pomianowska, R. Lollini, W. Pasut, A. Knotzer, P. Engelmann, A. Stafford e G. Reynders, "IEA EBC Annex 67 Energy flexible Buildings," *Energy and Buildings*, vol. 155, pp. 25-34, 2017.
- [24] "Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them," U.S. Department of Energy, Fevereiro 2006.
- [25] P. Dabur, G. Singh e N. K. Yadav, "Electricity Demand Side Management: Various Concept and Prospects," *International Journal of Recent Tecnology and Engineering*, vol. 1, pp. 2277-3878, 2011.
- [26] D. H. Li e J. C. Lam, "Analysis of solar heat gain factors using sky clearness index and energy implications," *Energy Conversion and Management*, vol. 42, pp. 555-571, 2001.
- [27] G. Reynders, T. Nuytten e D. Saelens, "Potential of structural thermal mass for demand-side management in dwellings," *Building and Environment*, vol. 64, pp. 187-199, 2013.
- [28] J. I. Dréau e P. Heiselberg, "Energy flexibility of residential buildings using short term heat storage in the thermal mass," *Energy*, vol. 111, pp. 991-1002, 2016.
- [29] S. Verbeke e A. Audenaert, "Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2300-2318, 2018.

- [30] M. J. O. Panão, N. M. Mateus e G. C. d. Graça, “Measured and modeled performance of internal mass as a thermal energy battery for energy flexible residential buildings,” *Applied Energy*, vol. 239, pp. 252-267, 2019.
- [31] “NREL,” [Online]. Available: <https://midcdmz.nrel.gov>.
- [32] M. G. Lawrence e M. Planck, “The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air,” *American Meteorological Society*, vol. 86 (2), p. 225–234, 2005.
- [33] “Techopedia,” [Online]. Available: <https://www.techopedia.com/definition/33829/pandaspython>. [Acedido em 24 Janeiro 2020].
- [34] “PVEducation,” [Online]. Available: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/terrestrial-solar-radiation>. [Acedido em 6 Janeiro 2020].
- [35] J. Duffie e W. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Process*, fourth edition, Wiley, 2013.
- [36] C. A. e Gueymard, “A reevaluation of the solar constant based on 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation observations,” *Solar Energy*, vol. 168, pp. 2-9, 2018.
- [37] M. Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, Vancouver, 2006.
- [38] “Britannica,” [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/Koppen-climate-classification>. [Acedido em 15 Março 2020].
- [39] M. Deru, K. Field, D. Studer, B. Liu, M. Halverson, D. Winiarski, M. Yazdanian, J. Huang e D. Crawley, “U.S. Department of Energy Commercial Reference Building Models of the National Building Stock,” 2011.
- [40] R. A. M. Palma, “Projeto de Edifício de Serviços com Balanço de Energia Nulo,” Tese de Mestrado Integrado, Engenharia da Energia e do Ambiente, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Lisboa, 2019.
- [41] “Inside Heat Balance. Engineering Reference — EnergyPlus 8.3,” [Online]. Available: <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-3/engineering-reference/inside-heat-balance.html#inside-heat-balance>. [Acedido em 2020].
- [42] N. R. Martins e G. C. d. Graça, “Impact of outdoor PM2.5 on natural ventilation usability in California’s nondomestic buildings,” *Applied Energy*, vol. 189, pp. 711-724, 2017.
- [43] “Zone capacitance multiplier. Engineering Reference — EnergyPlus 8.7,” [Online]. Available: <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-7/engineering-reference/hybrid-model.html#zone-capacitance-multiplier>. [Acedido em 8 2020].
- [44] T. Hong e S. H. Lee, “Integrating physics-based models with sensor data: An inverse modeling approach,” *Building and Environment*, vol. 154, pp. 23-31, 2019.
- [45] S. H. Lee e T. Hong, “Leveraging zone air temperature data to improve physics-based energy simulation of existing buildings,” em *15th IBPSA Conference*, San Francisco, CA, USA.
- [46] ASHRAE, “ASHRAE guideline 14-2002: Measurement of energy and demand savings (2002)”.

[47] S. H. Lee e T. Hong, “Validation of an inverse model of zone air heat balance,” *Building and Environment*, vol. 161, p. 106232, 2019.

[48] “DRE,” Portaria n.º 17-A/2016, [Online]. Available: <https://dre.pt>.

Anexos

Anexo A – Cenário 1 Figuras

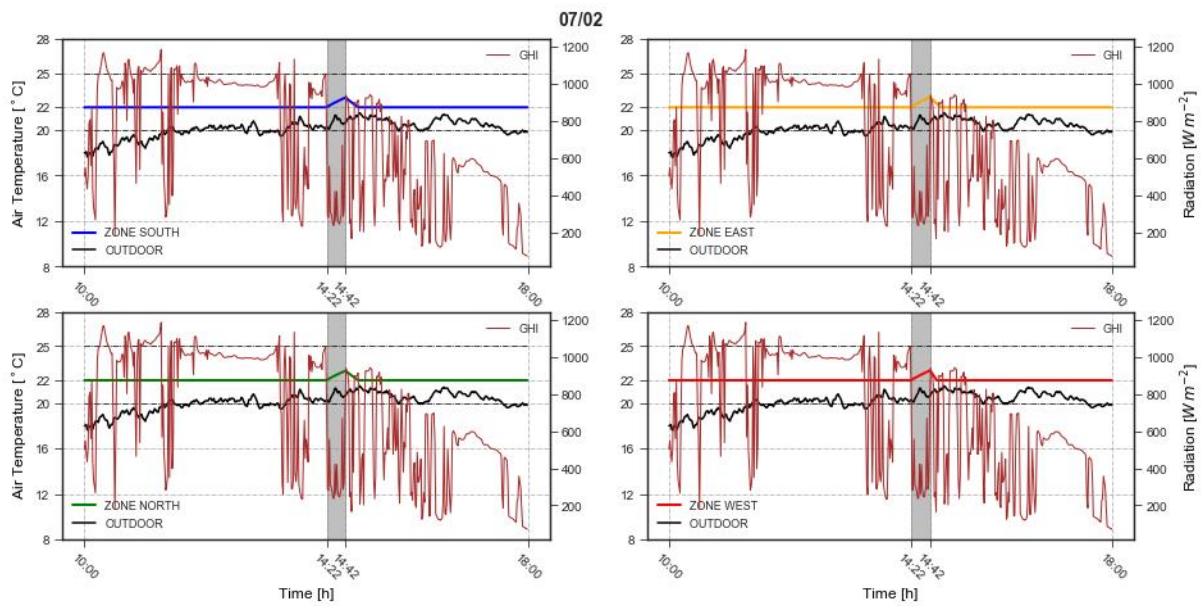


Figura A. 1: Simulação dinâmica dia 2 de julho

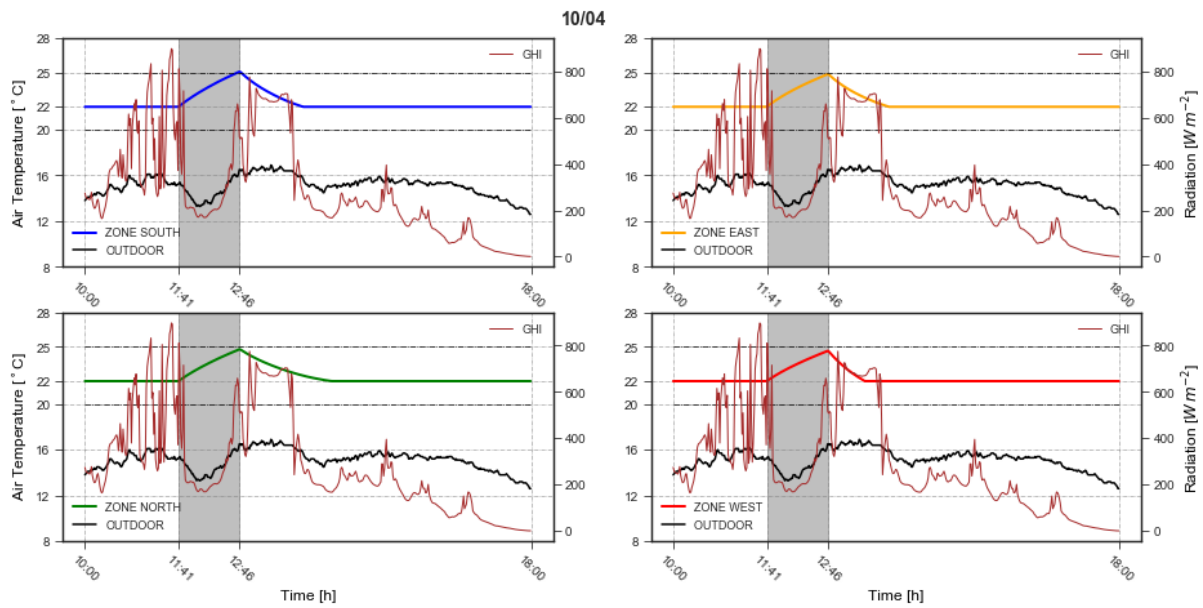


Figura A. 2: Simulação dinâmica dia 4 de outubro

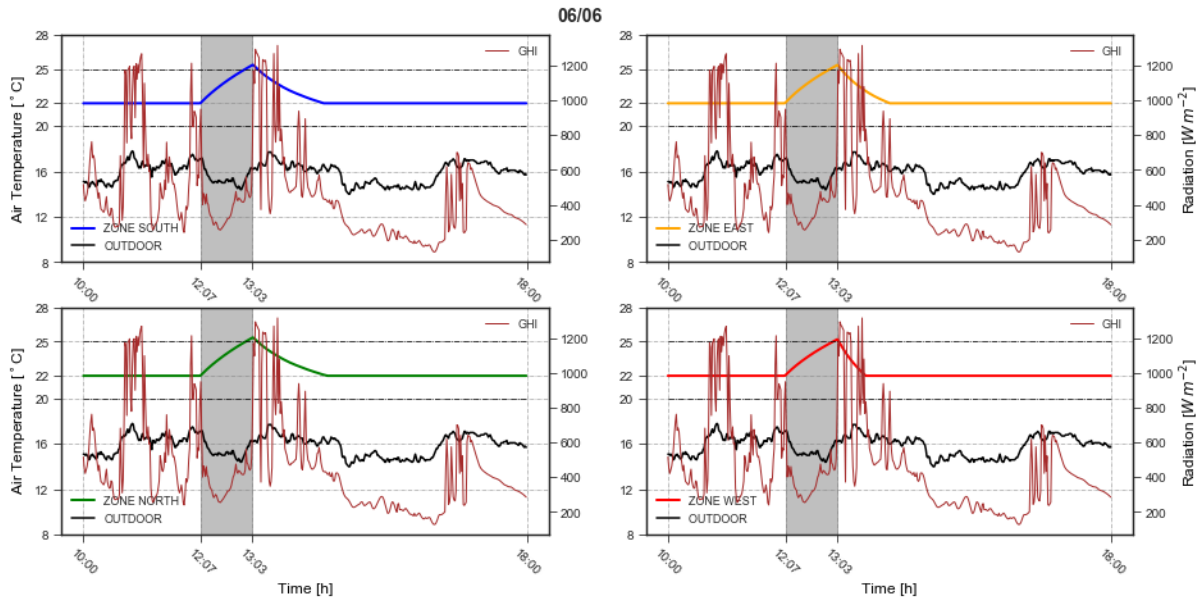


Figura A. 3: Simulação dinâmica dia 6 de junho

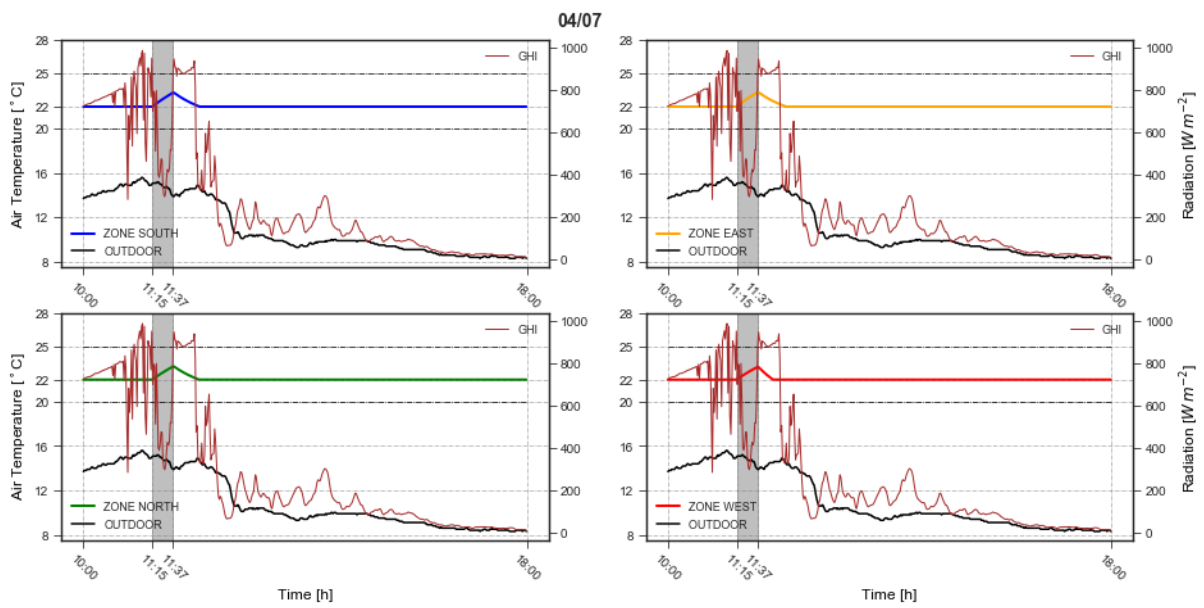


Figura A. 4: Simulação dinâmica dia 7 de abril

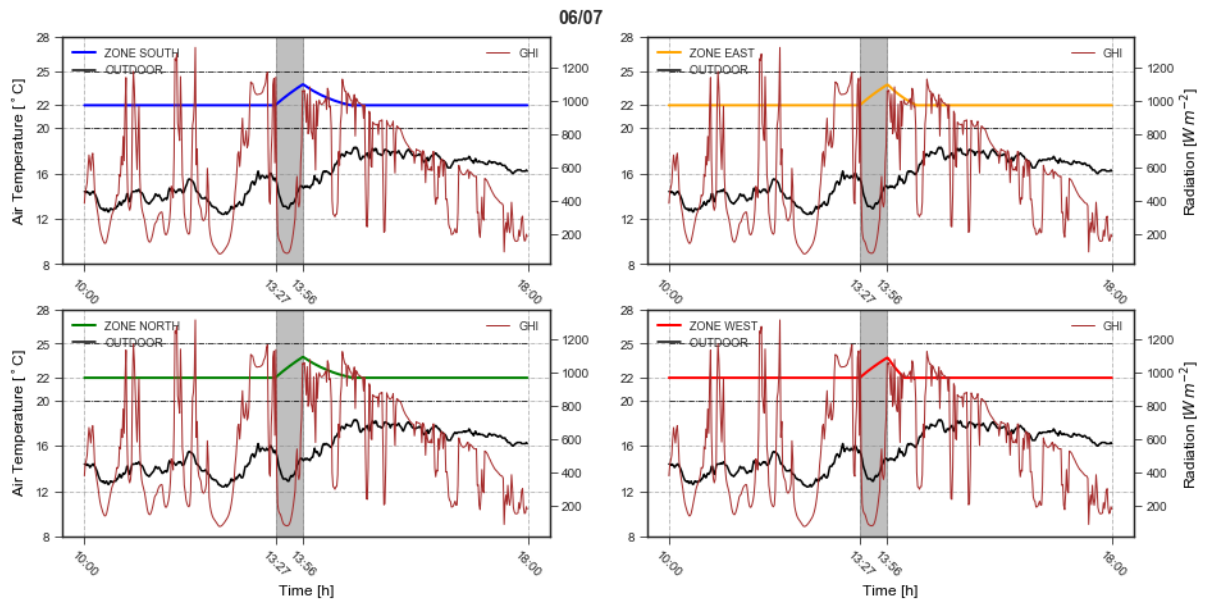


Figura A. 5: Simulação dinâmica dia 7 de junho

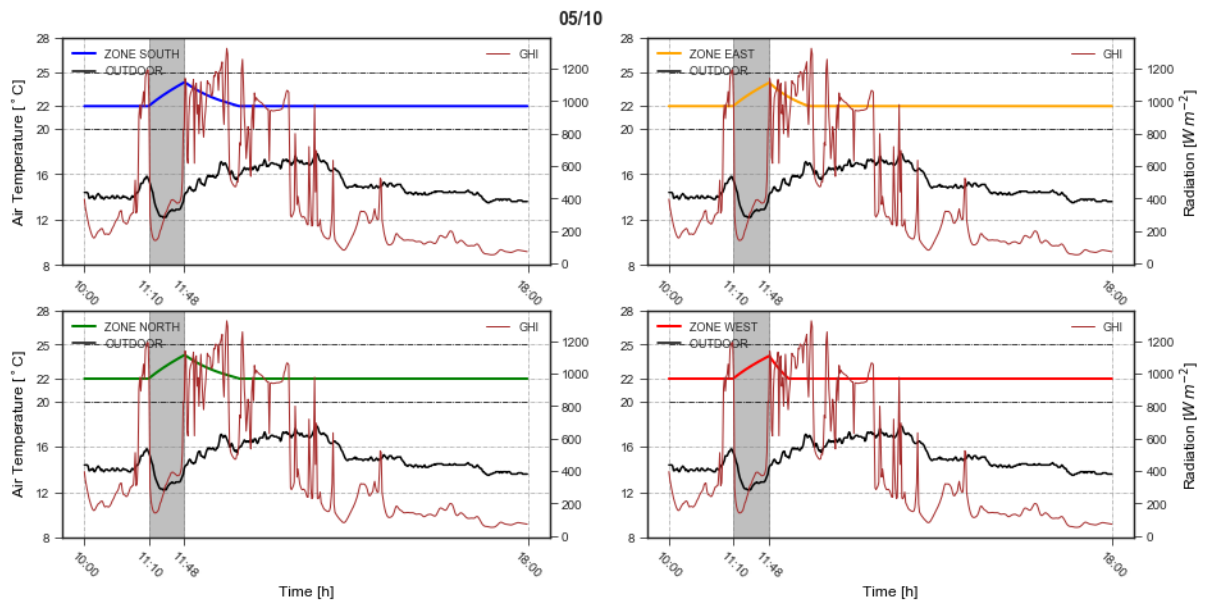


Figura A. 6: Simulação dinâmica dia 10 de maio

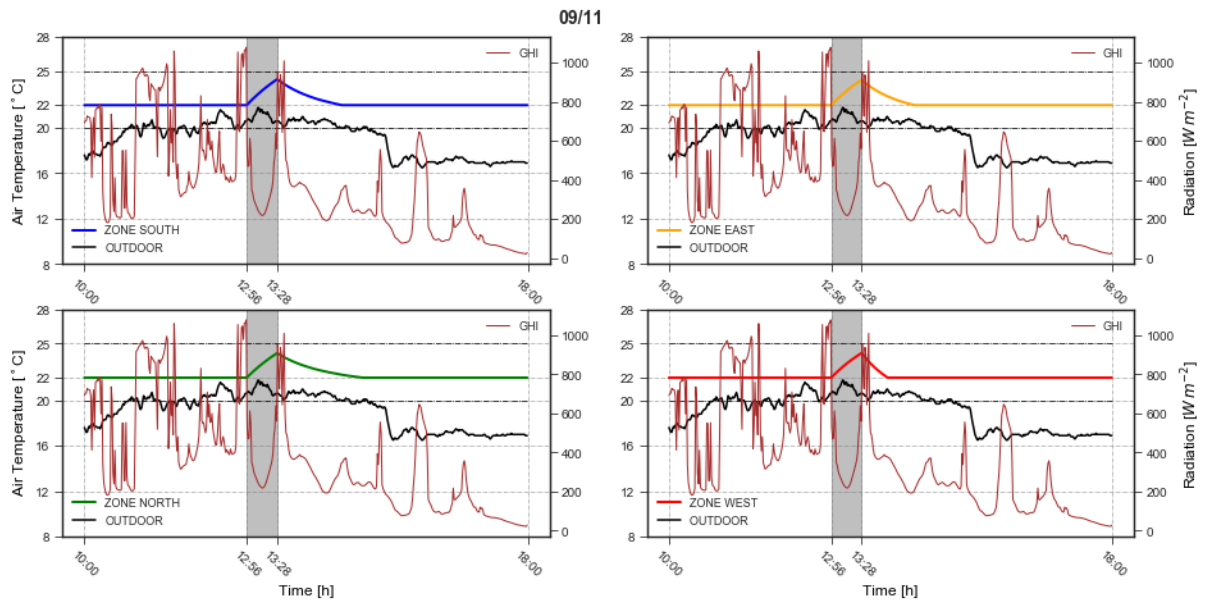


Figura A. 7: Simulação dinâmica dia 11 de setembro

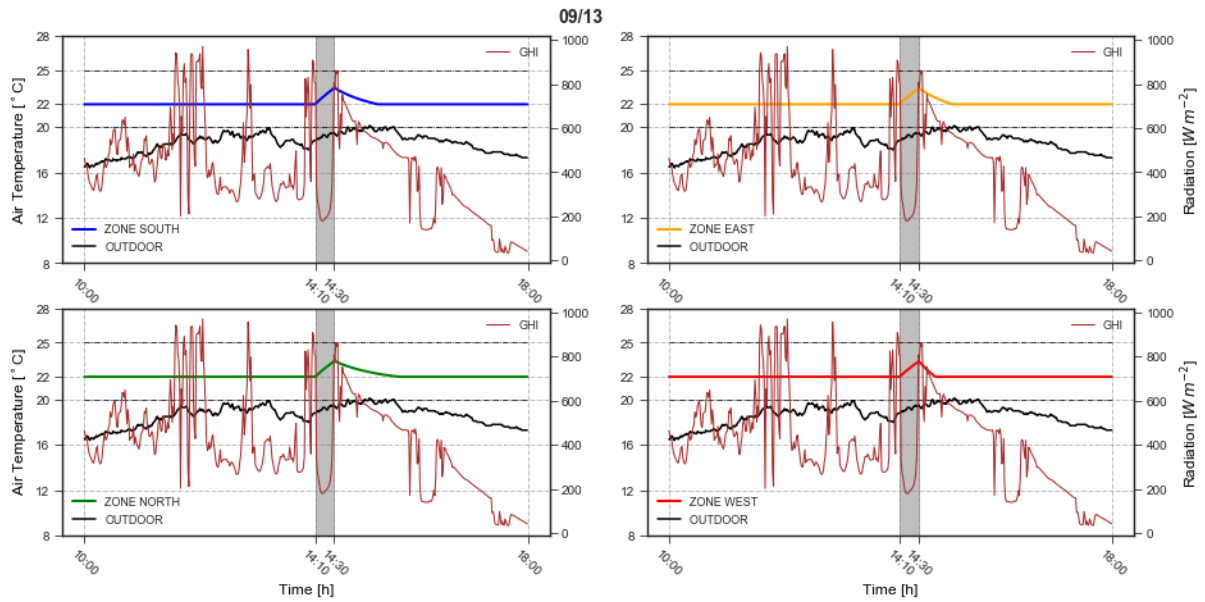


Figura A. 8: Simulação dinâmica dia 13 de setembro

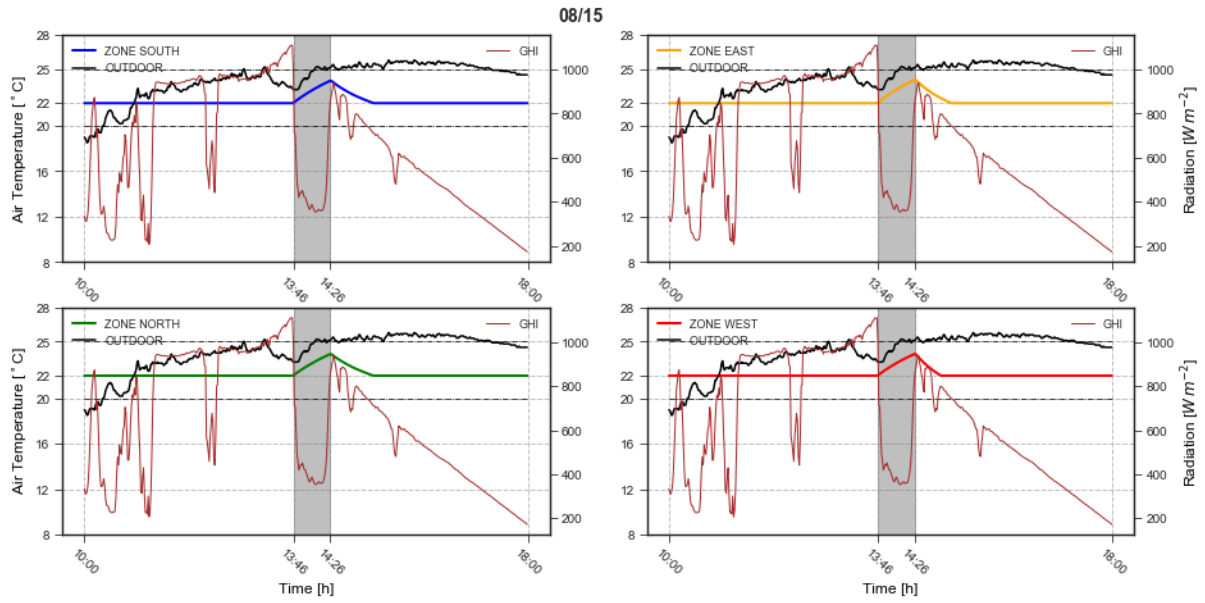


Figura A. 9: Simulação dinâmica dia 15 de agosto

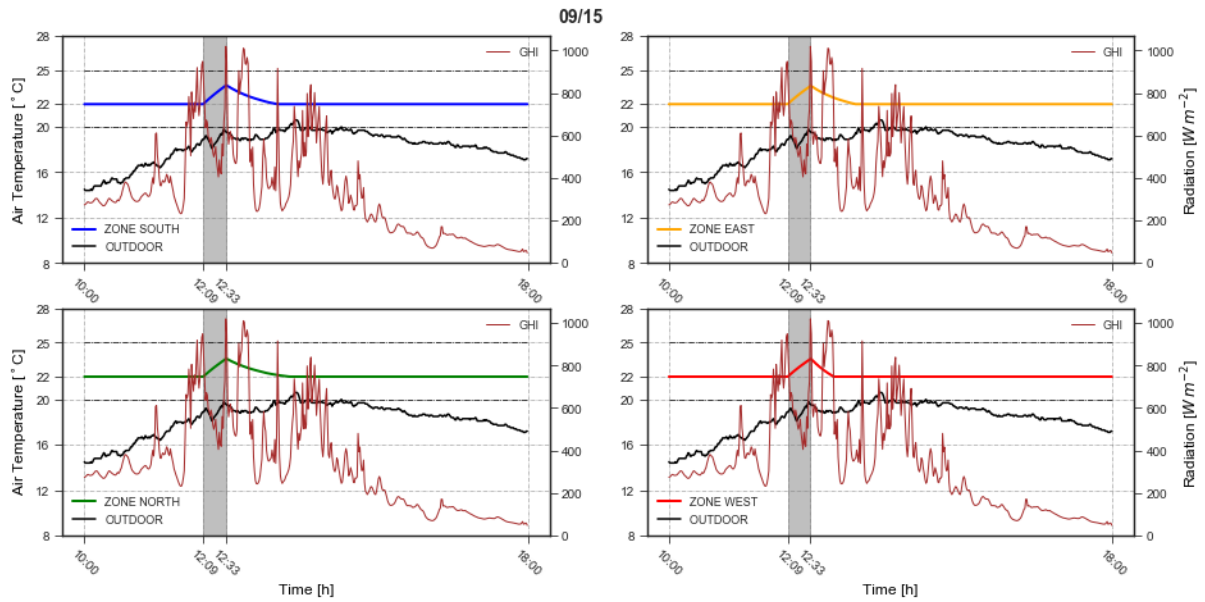


Figura A. 10: Simulação dinâmica dia 15 de setembro

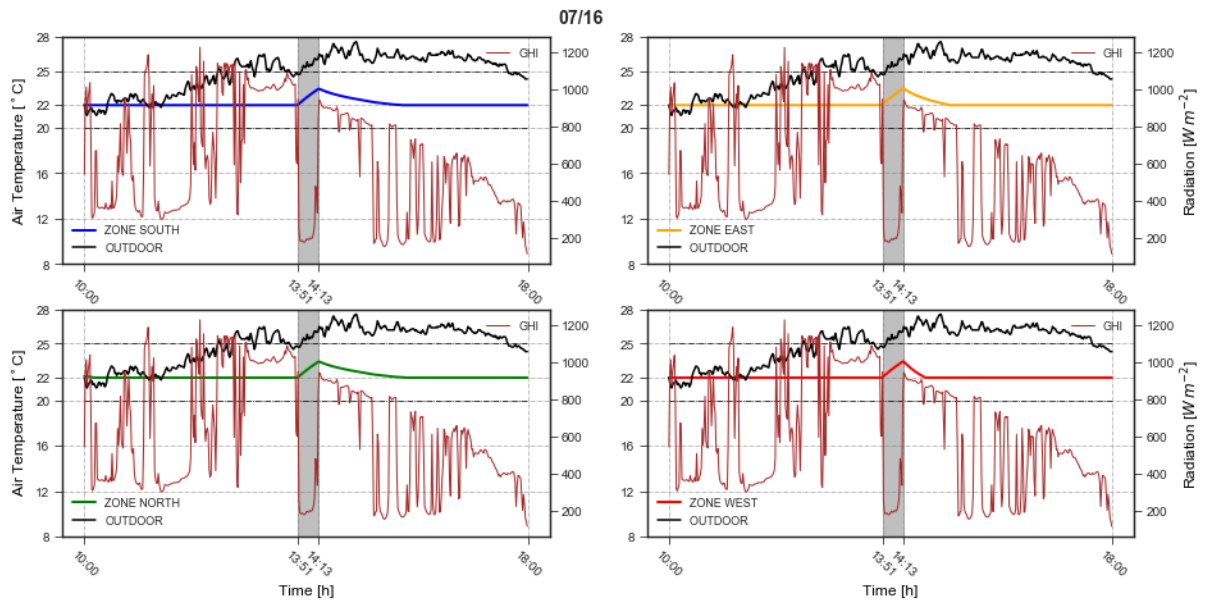


Figura A. 11: Simulação dinâmica dia 16 de julho

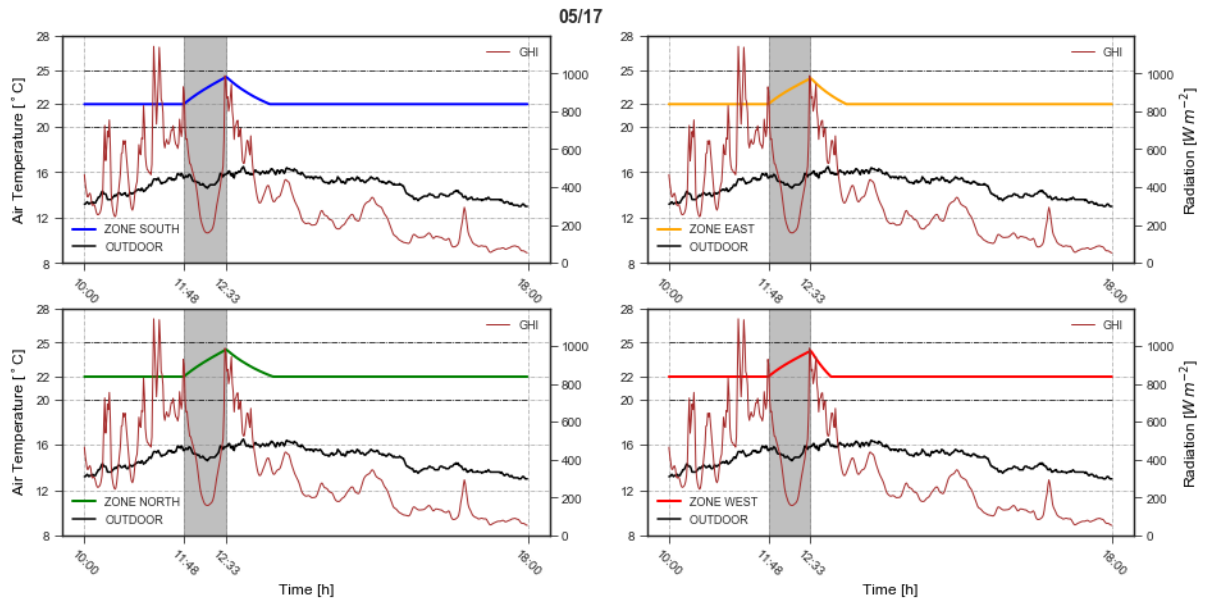


Figura A. 12: Simulação dinâmica dia 17 de maio

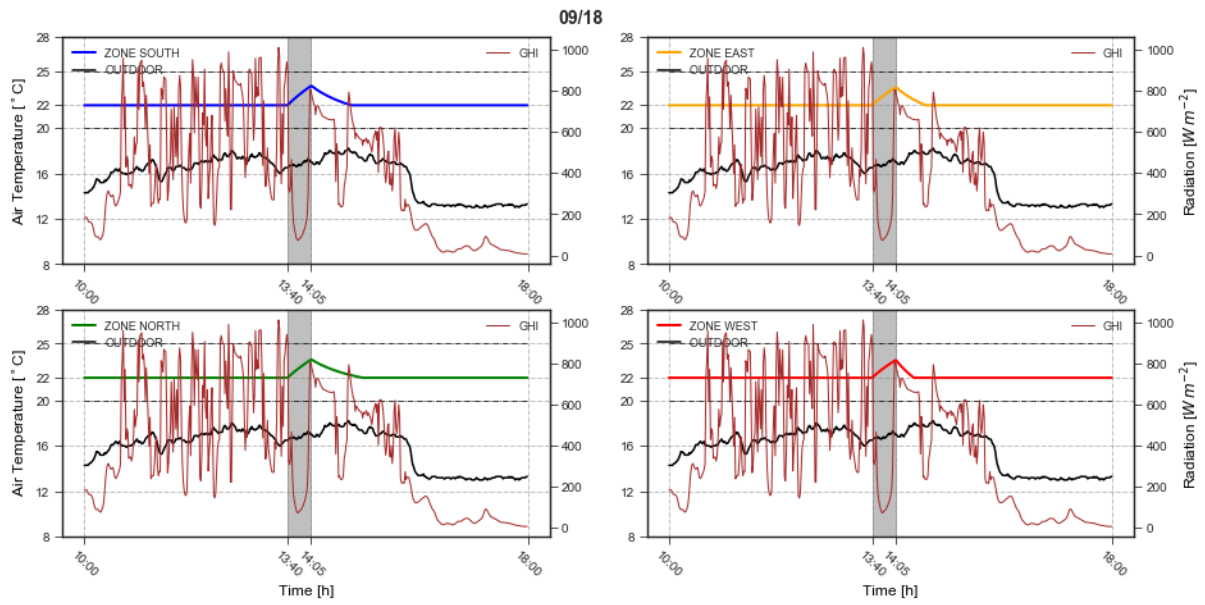


Figura A. 13: Simulação dinâmica dia 18 de setembro

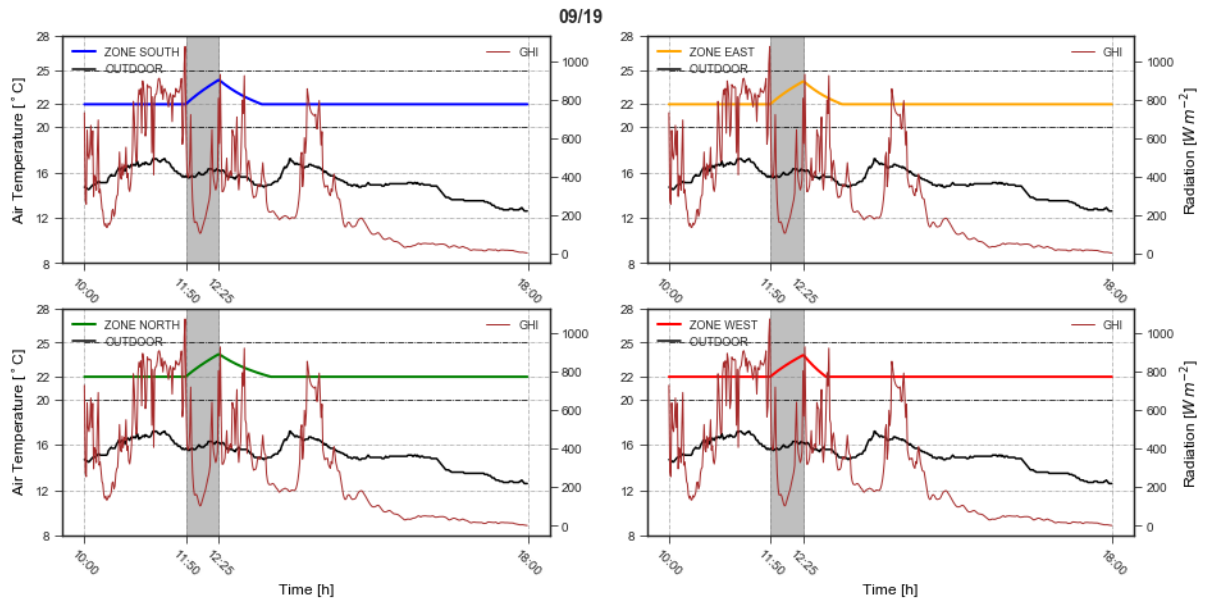


Figura A. 14: Simulação dinâmica dia 19 de setembro

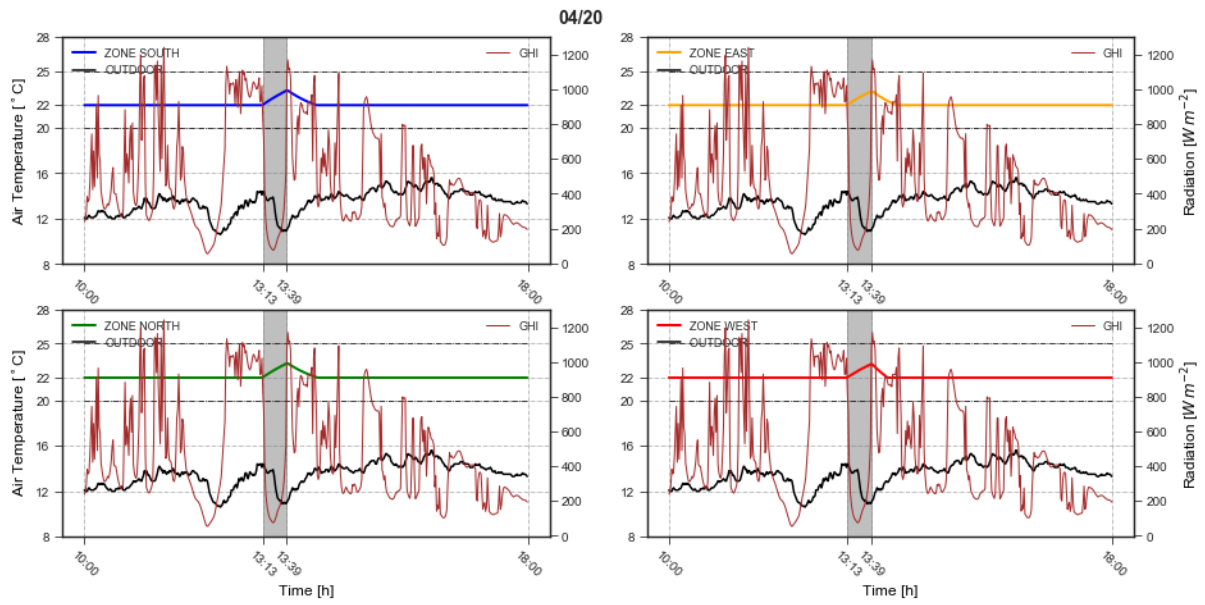


Figura A. 15: Simulação dinâmica dia 20 de abril

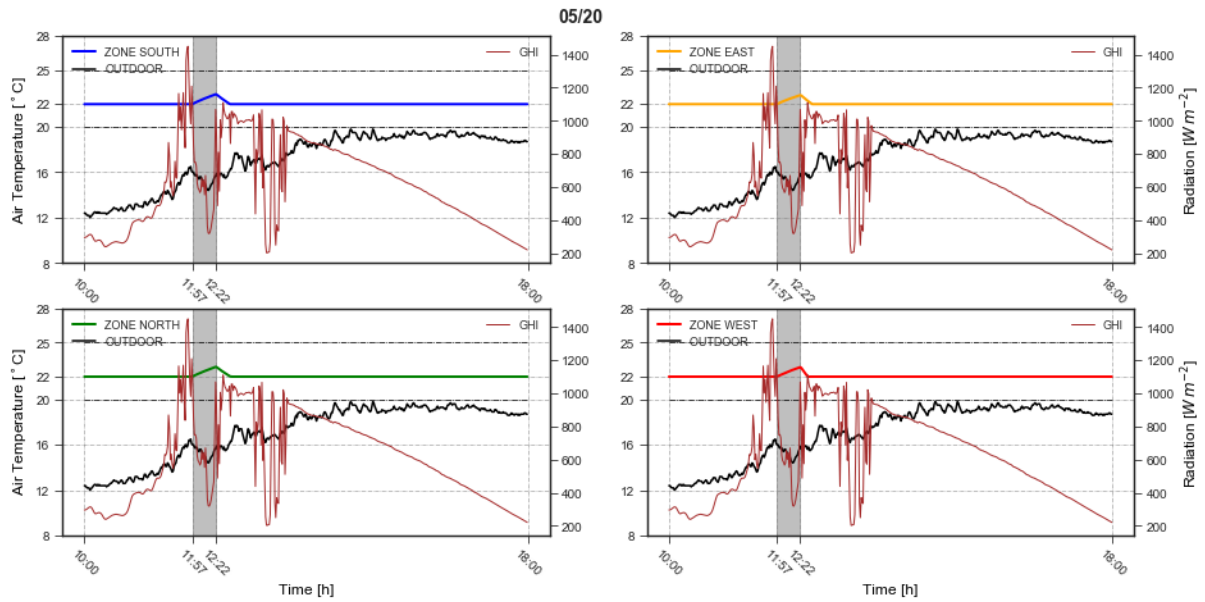


Figura A. 16: Simulação dinâmica dia 20 de maio

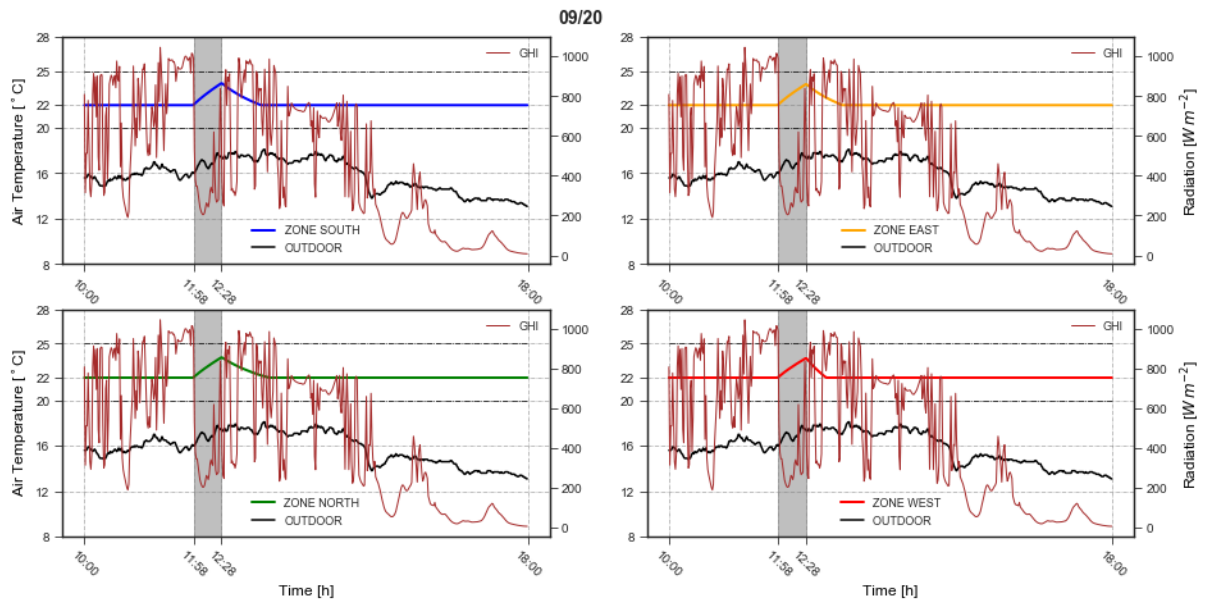


Figura A. 17: Simulação dinâmica dia 20 de setembro

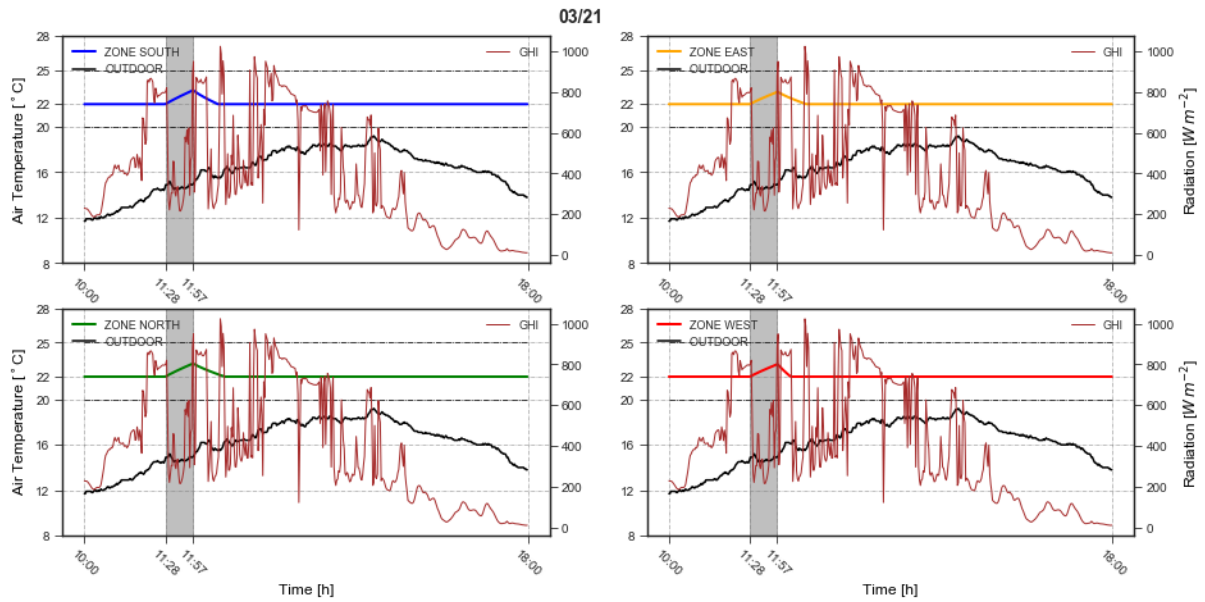


Figura A. 18: Simulação dinâmica dia 21 março

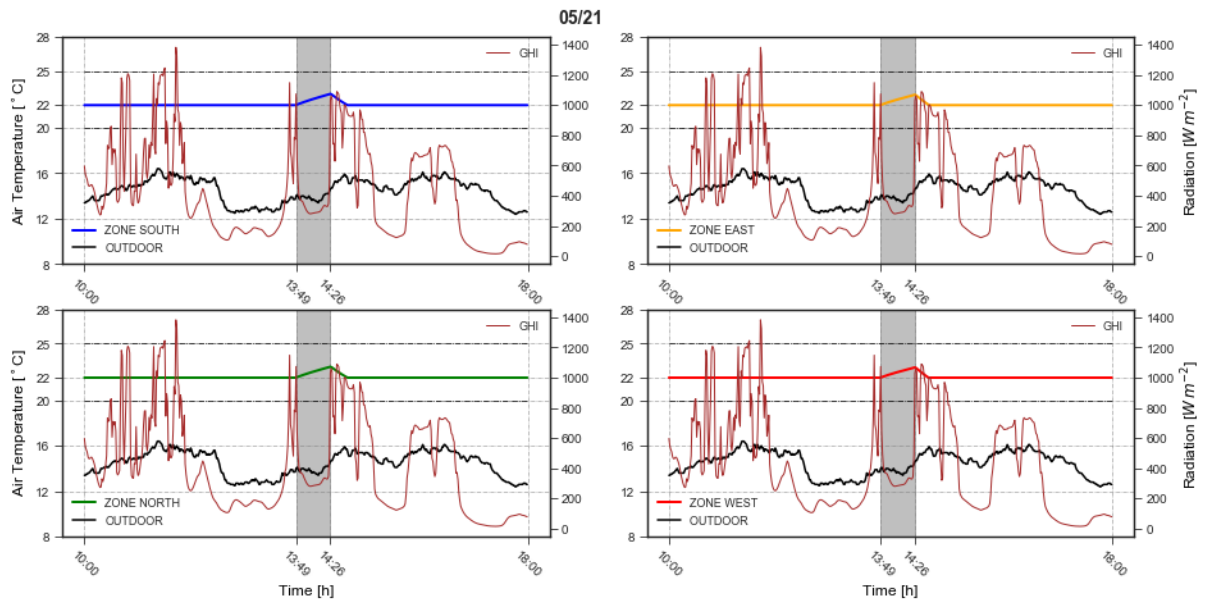


Figura A. 19: Simulação dinâmica dia 21 de maio

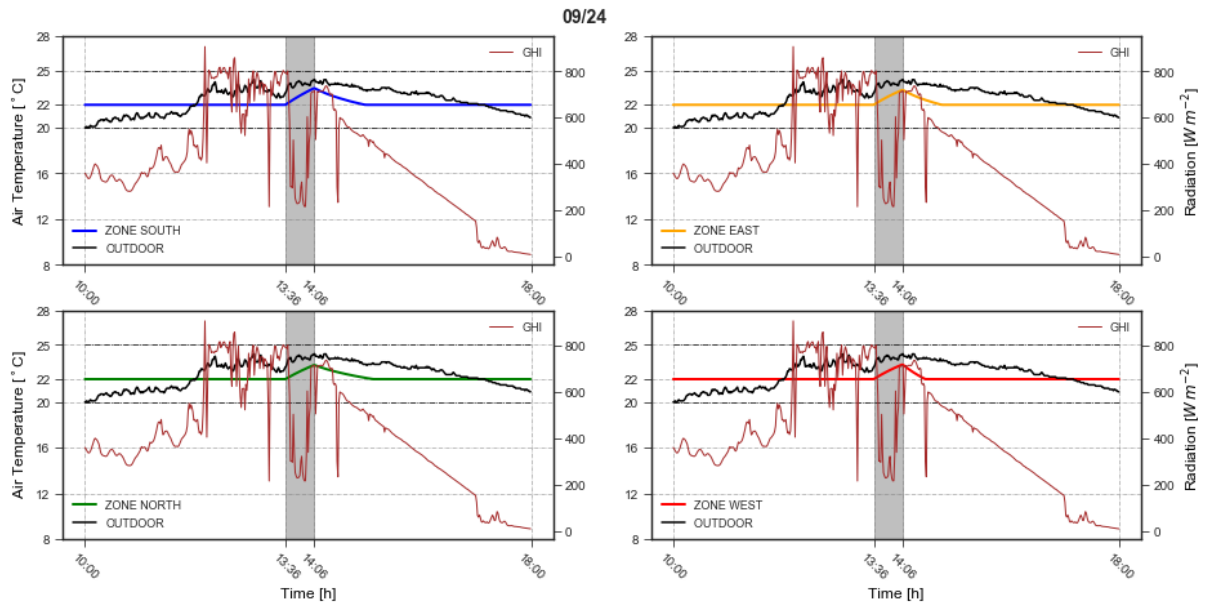


Figura A. 20: Simulação dinâmica dia 24 de setembro

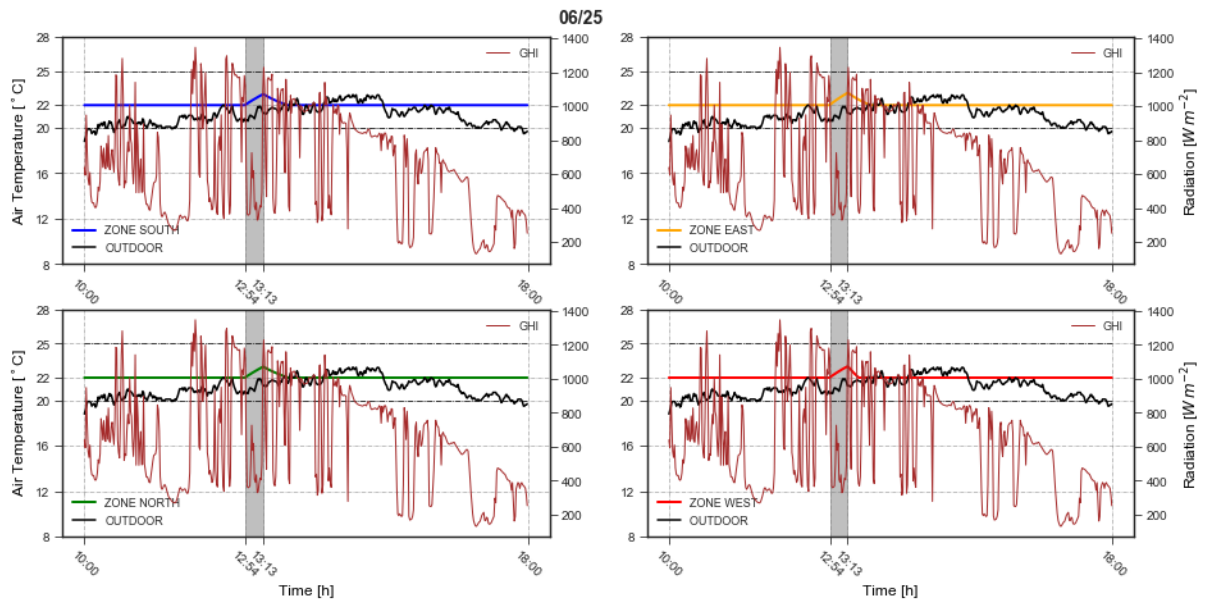


Figura A. 21: Simulação dinâmica dia 25 de junho

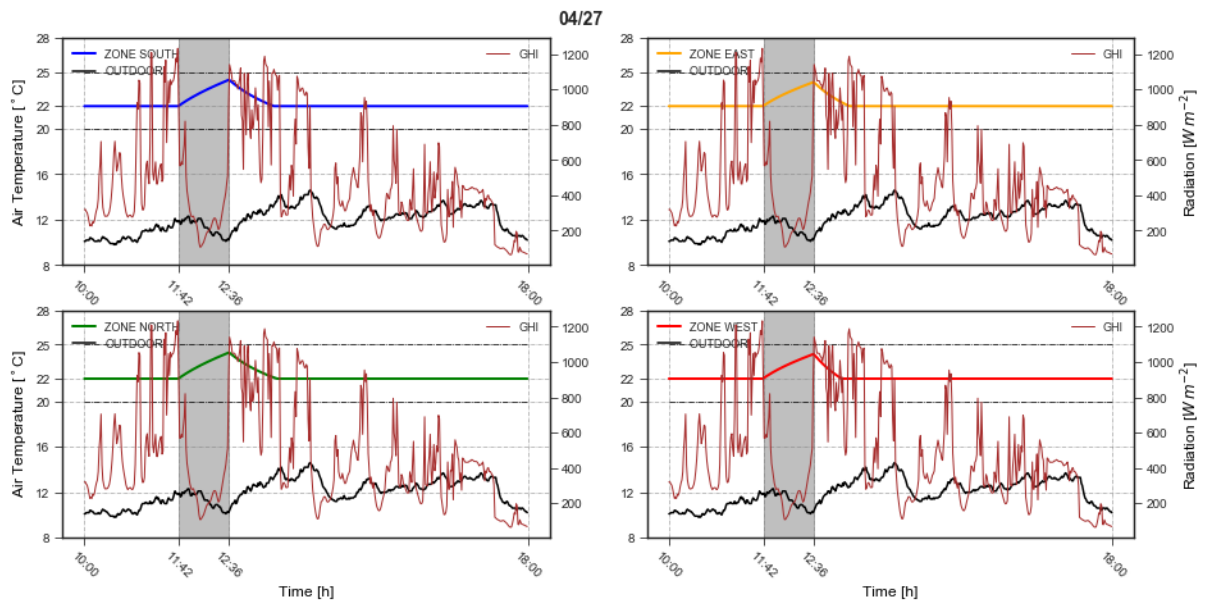


Figura A. 22: Simulação dinâmica dia 27 de abril

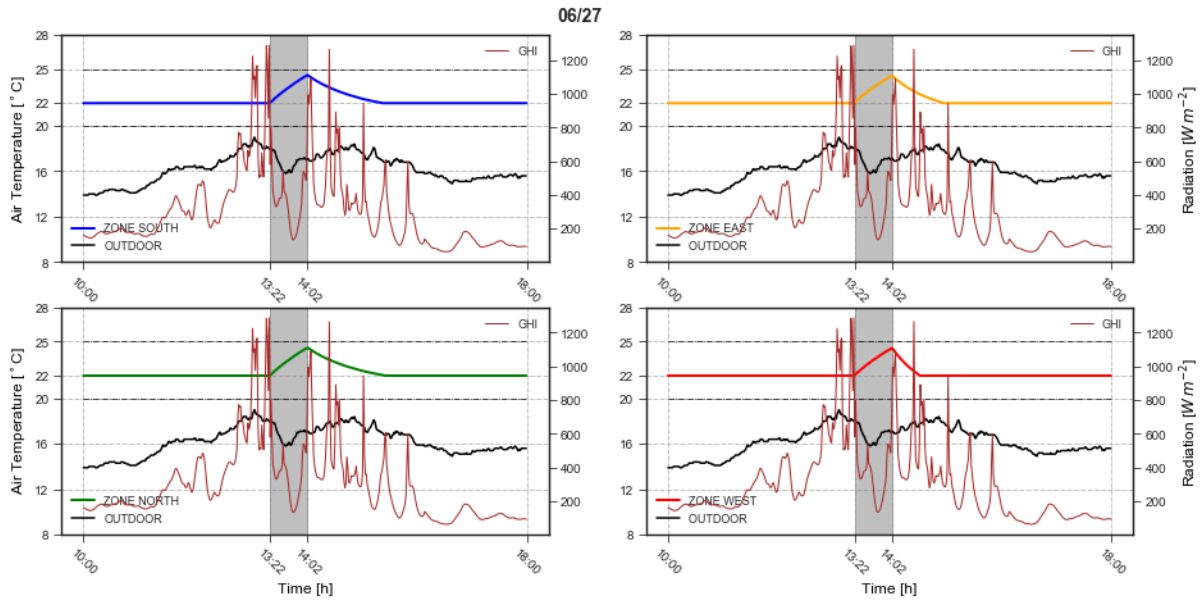


Figura A. 23: Simulação dinâmica dia 27 de junho

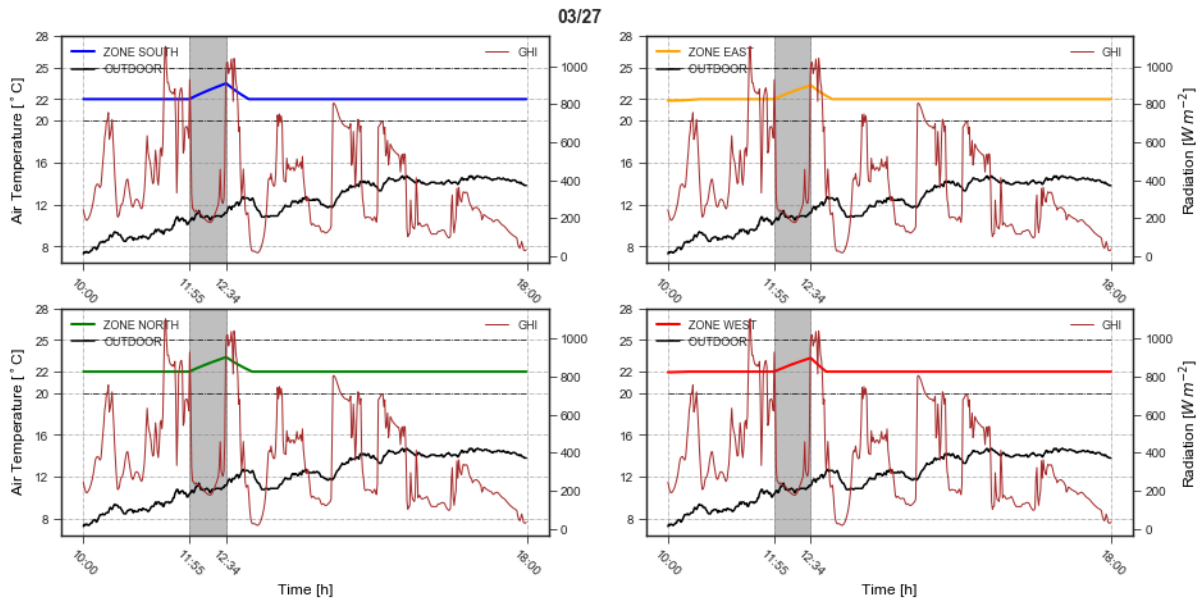


Figura A. 24: Simulação dinâmica dia 27 de março

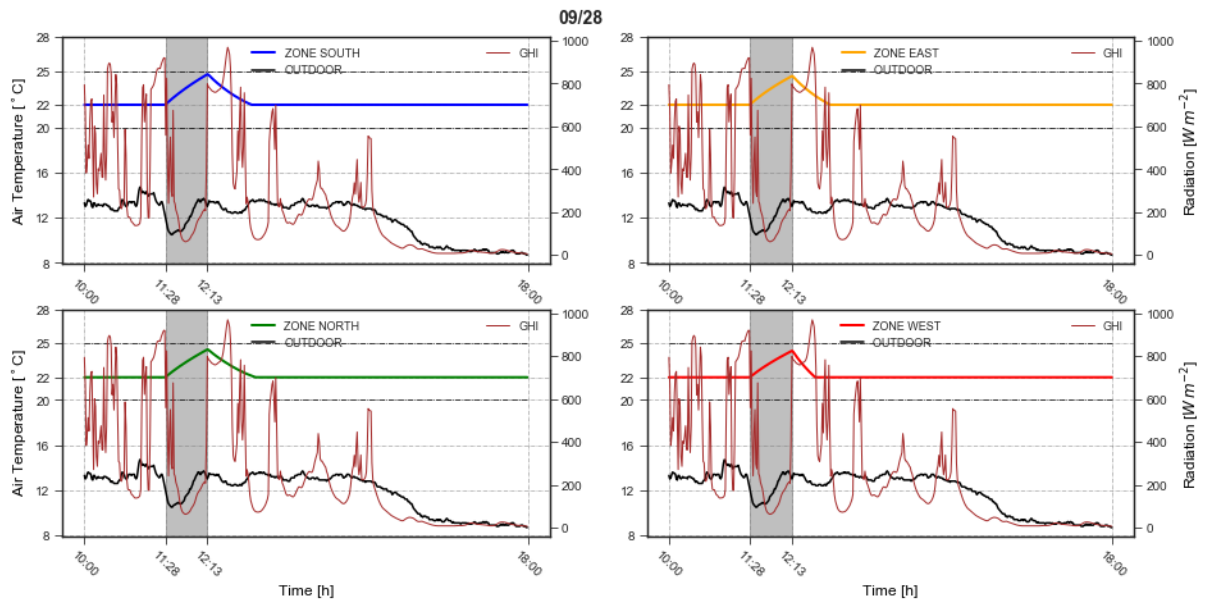


Figura A. 25: Simulação dinâmica dia 28 de setembro

Anexo B - Cenário 2 Figuras

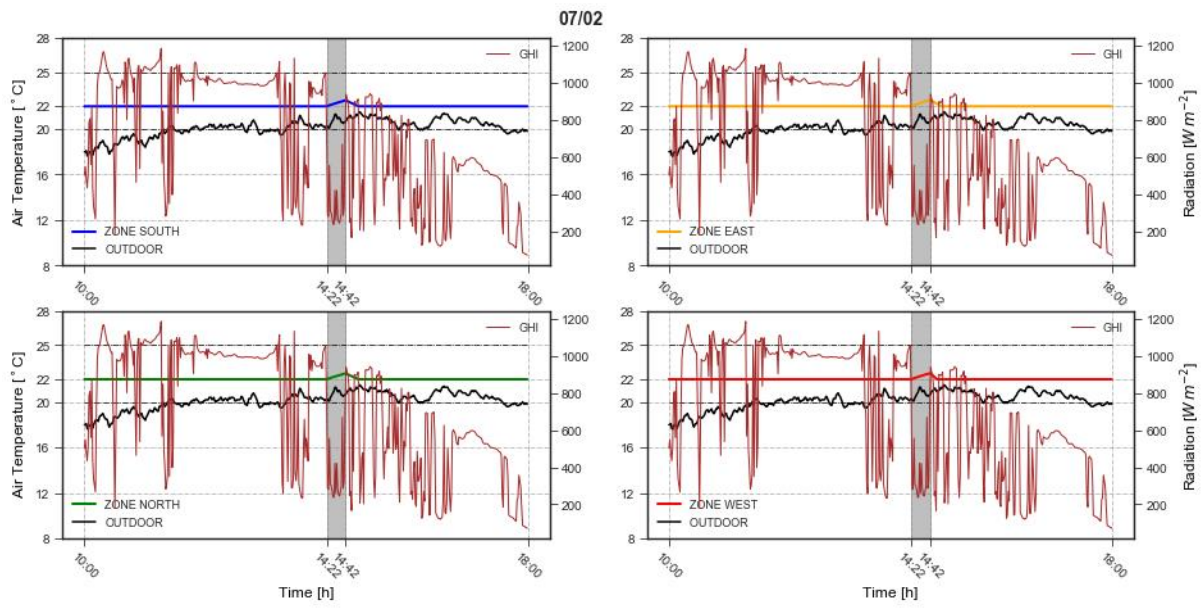


Figura B. 1: Simulação dinâmica dia 2 de julho

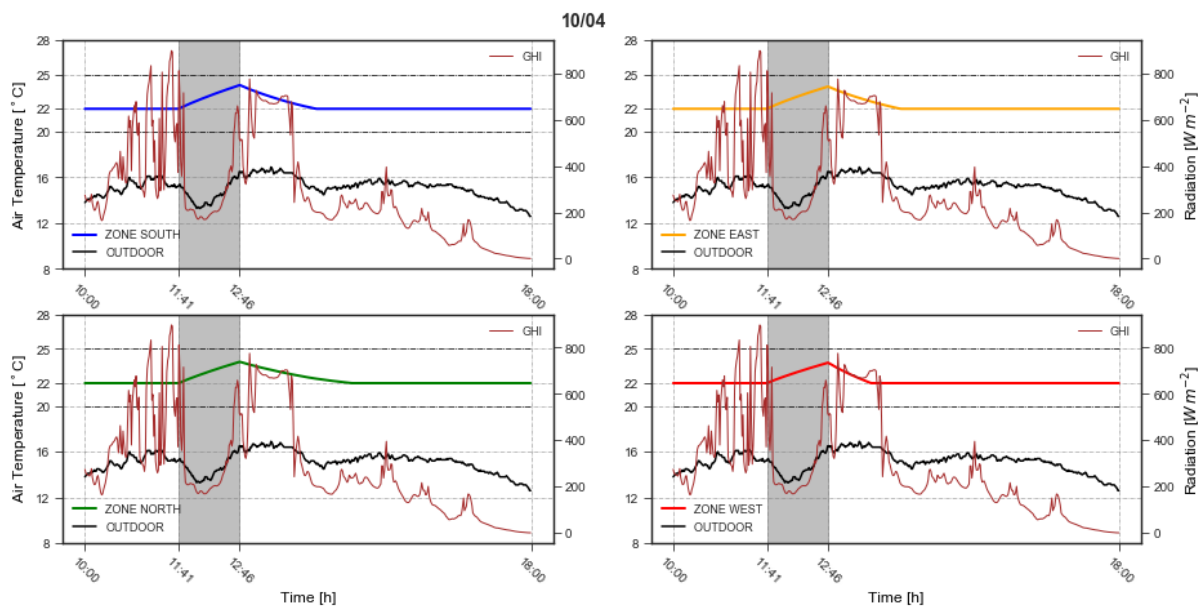


Figura B. 2: Simulação dinâmica dia 4 de outubro

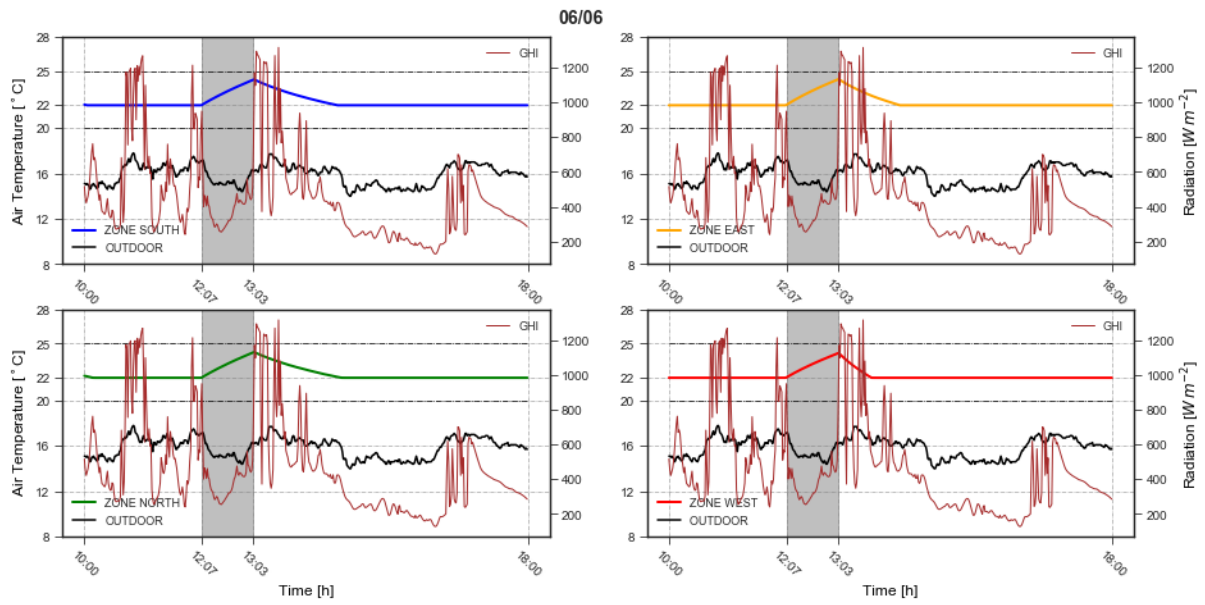


Figura B. 3: Simulação dinâmica dia 6 de junho

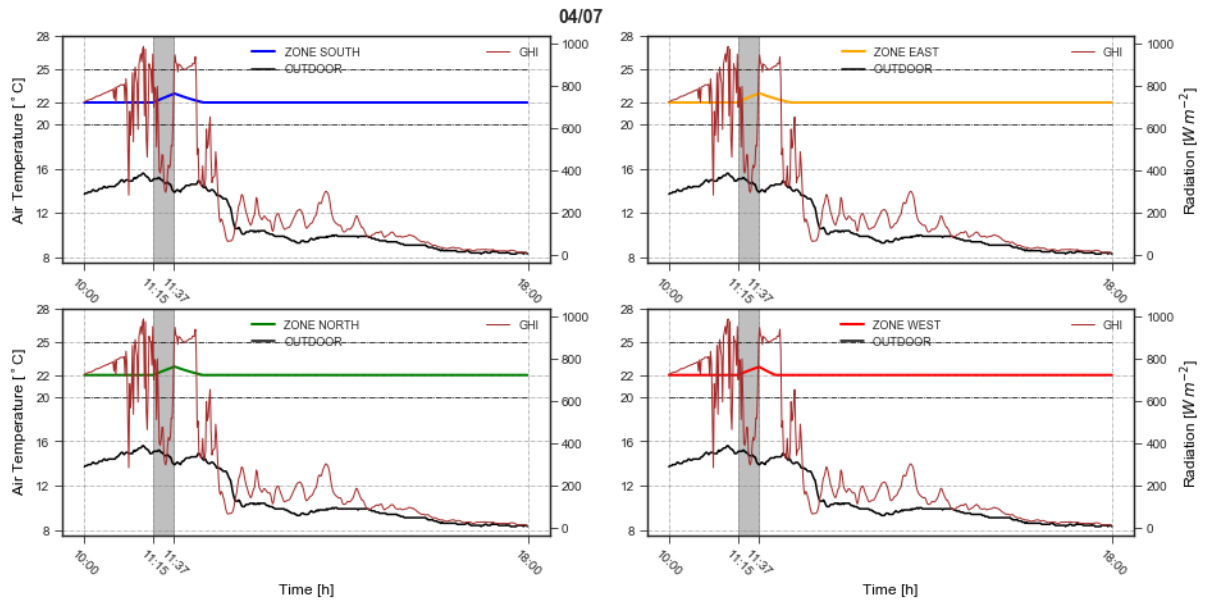


Figura B. 4: Simulação dinâmica dia 7 de abril

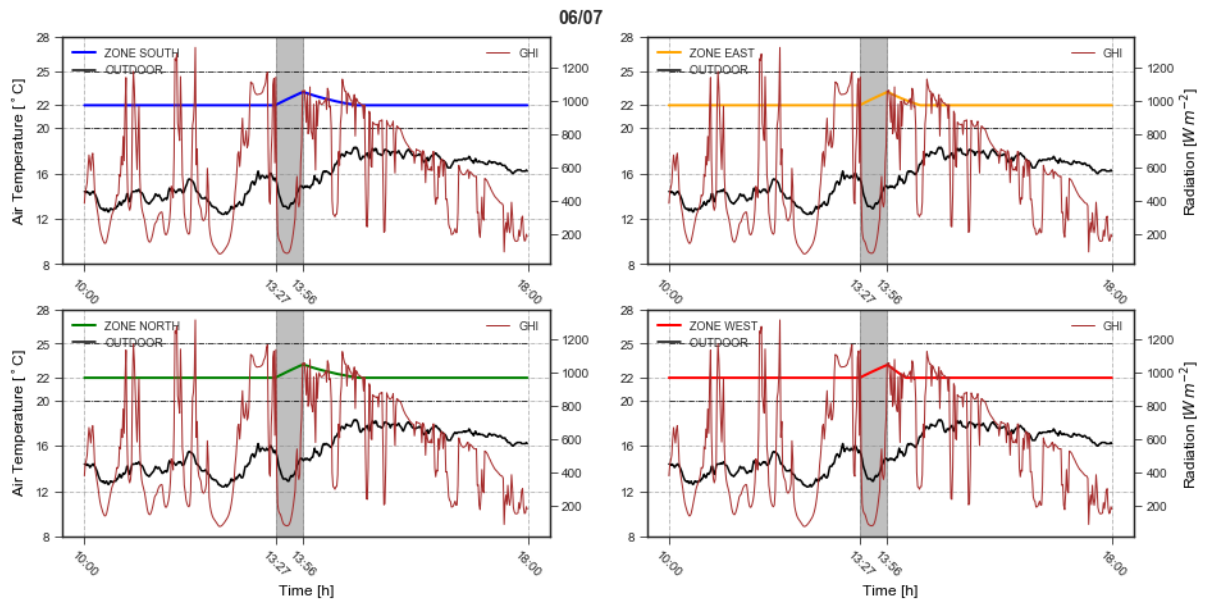


Figura B. 5: Simulação dinâmica dia 7 de junho

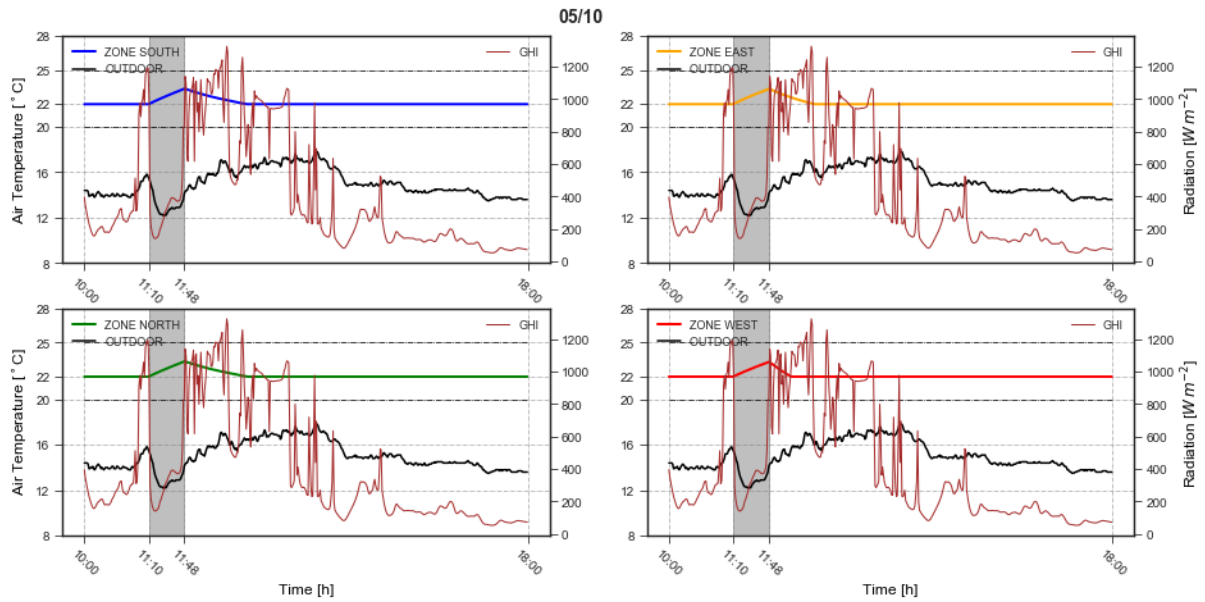


Figura B. 6: Simulação dinâmica dia 10 de maio

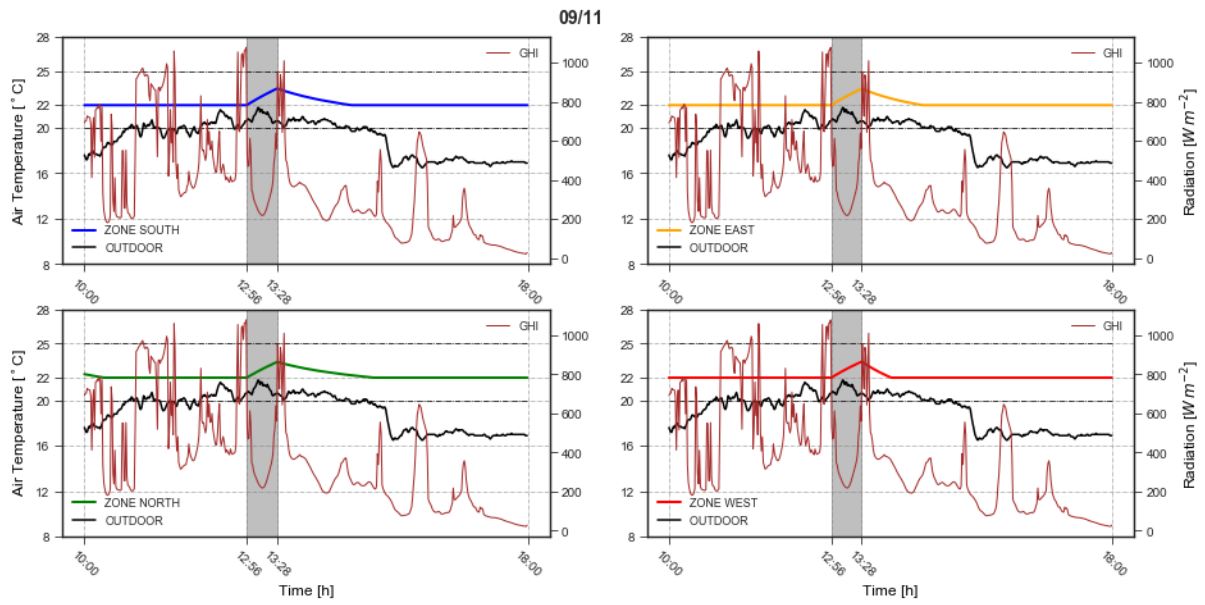


Figura B. 7: Simulação dinâmica dia 11 de setembro

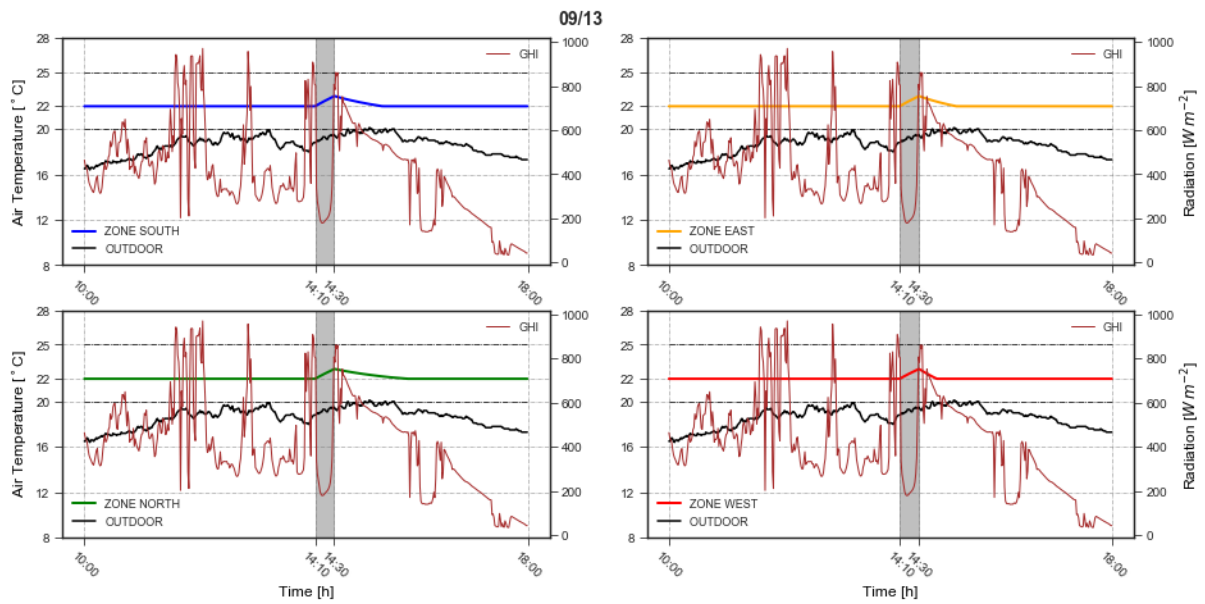


Figura B. 8: Simulação dinâmica dia 13 de setembro

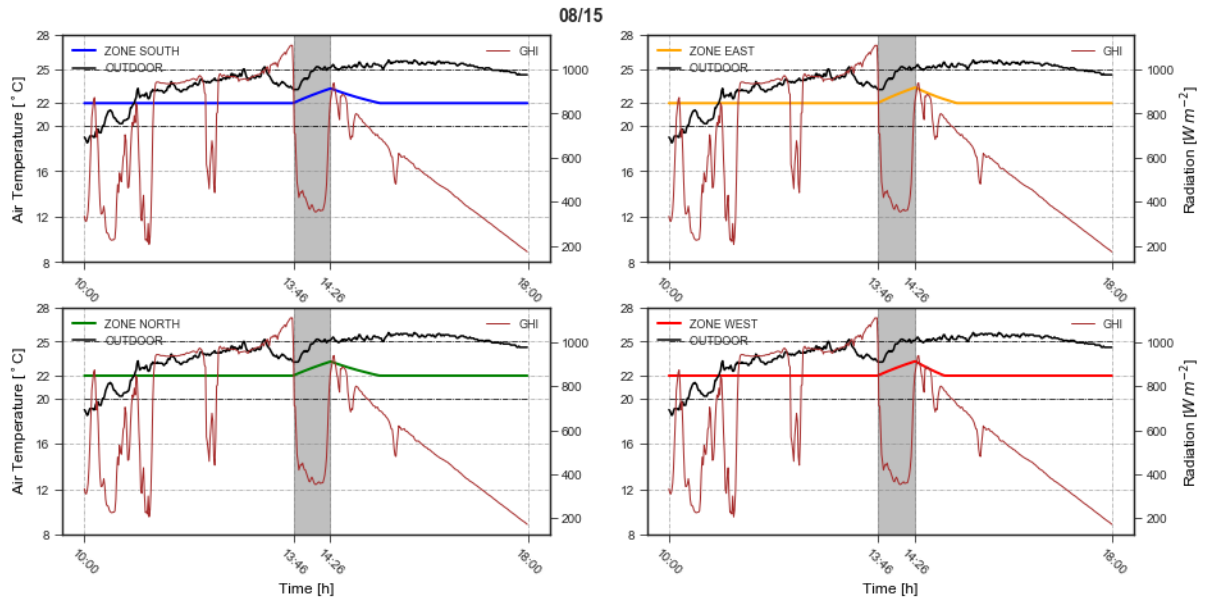


Figura B. 9: Simulação dinâmica dia 15 de agosto

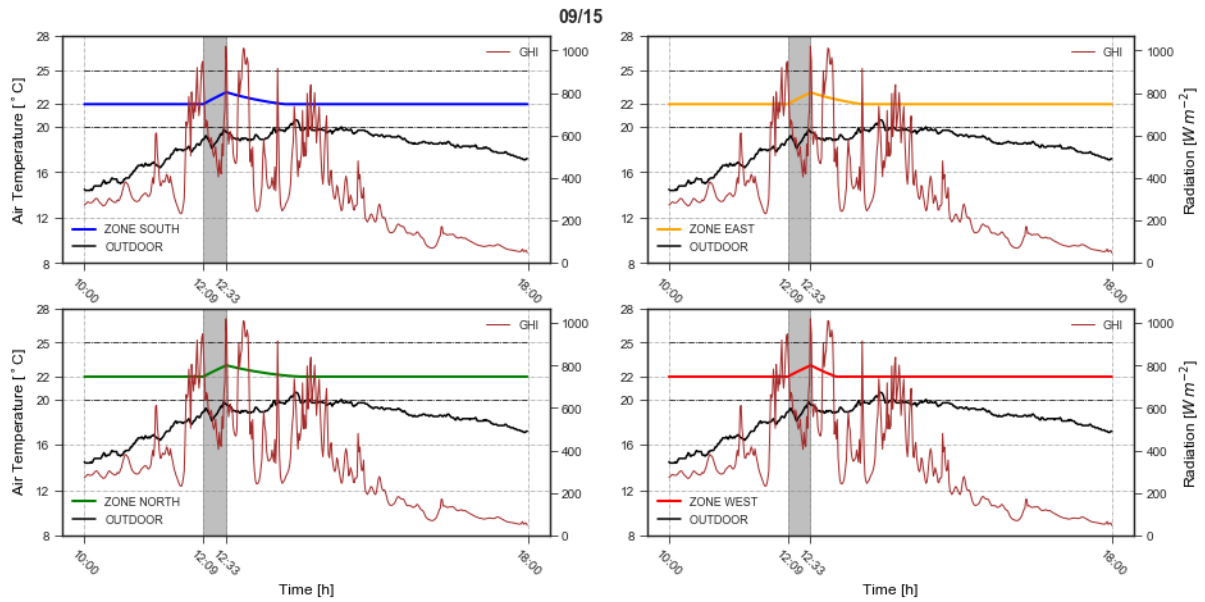


Figura B. 10: Simulação dinâmica dia 15 de setembro

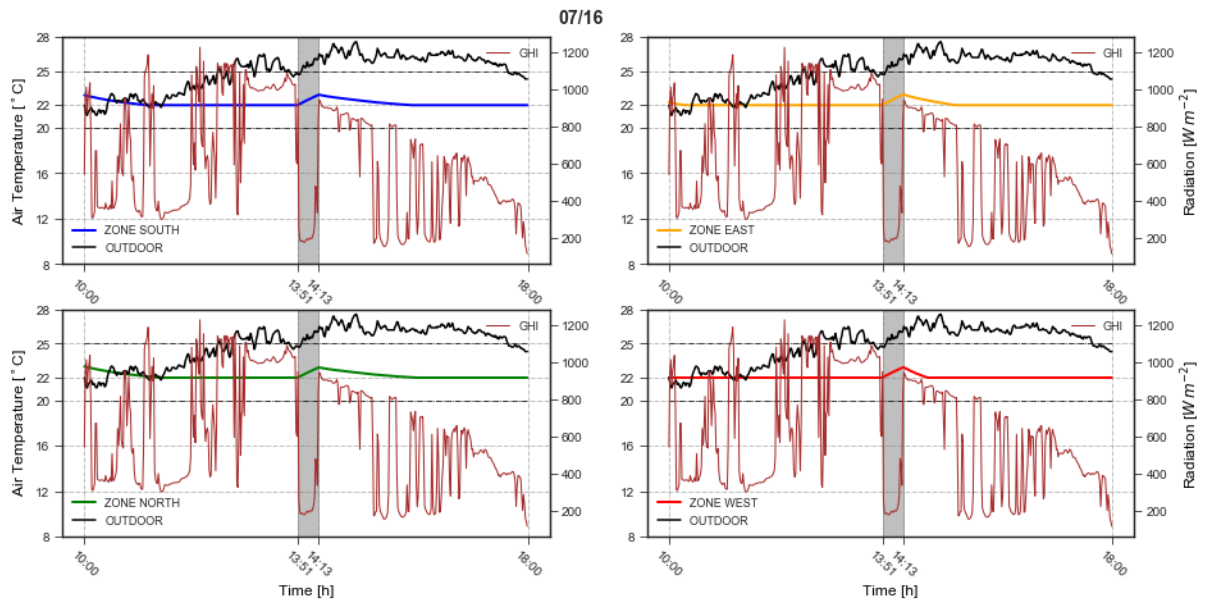


Figura B. 11: Simulação dinâmica dia 16 de julho

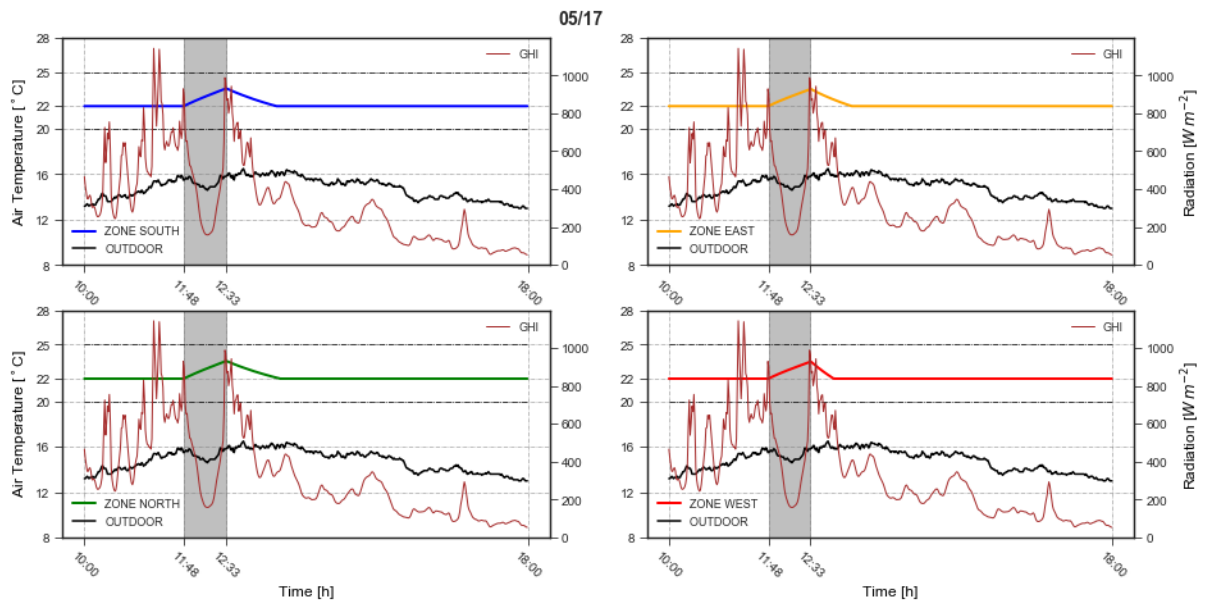


Figura B. 12: Simulação dinâmica dia 17 de maio

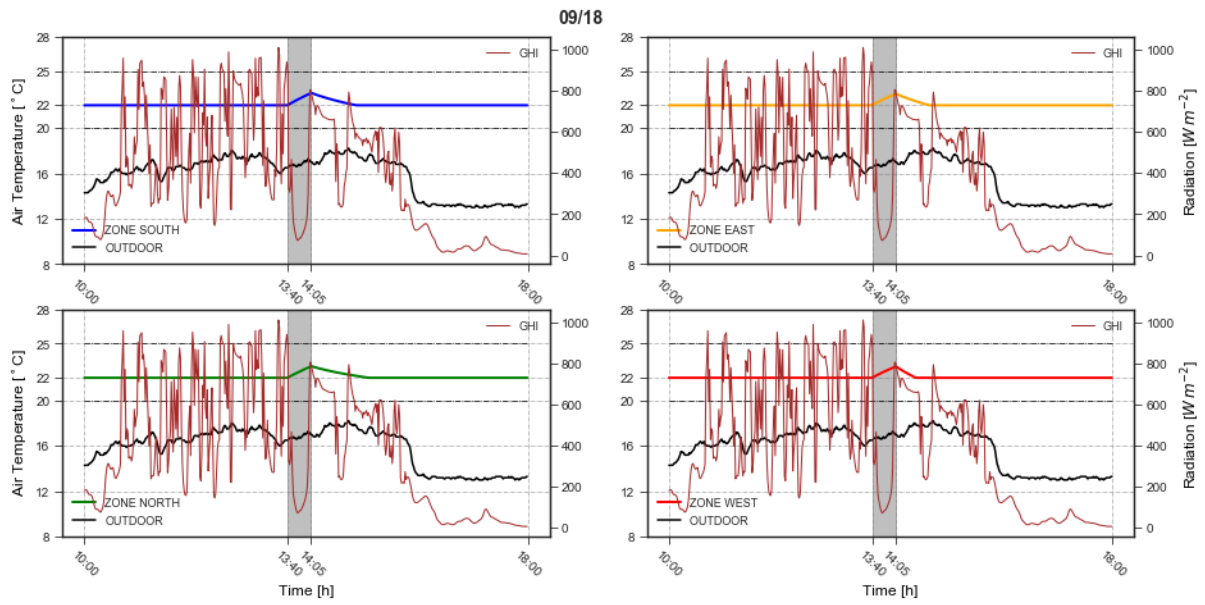


Figura B. 13: Simulação dinâmica dia 18 de setembro

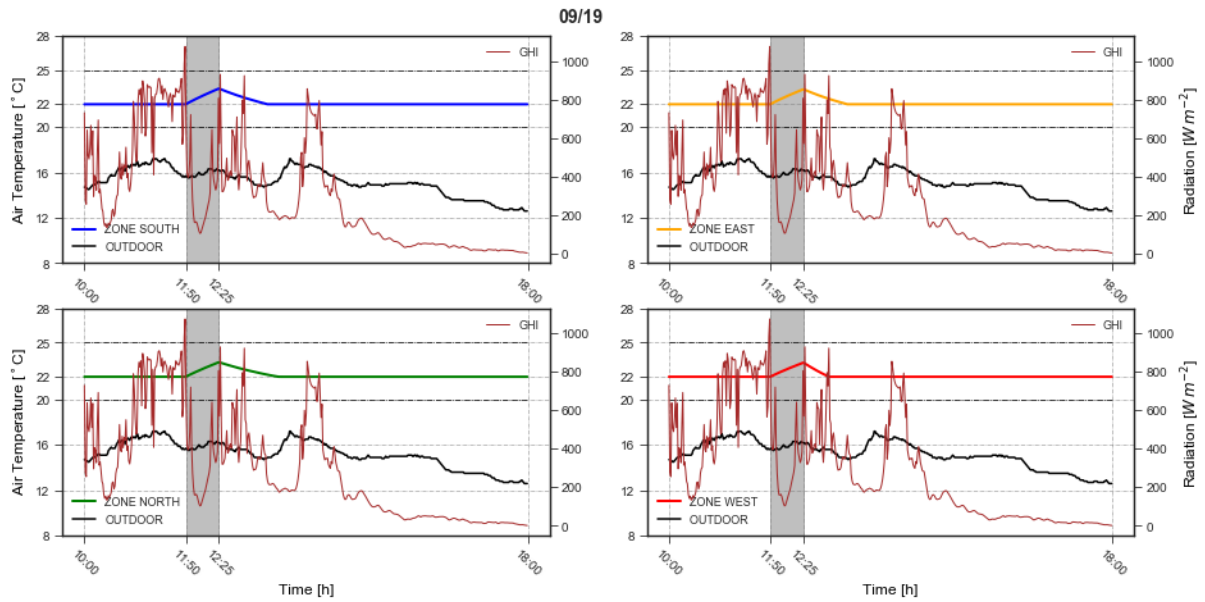


Figura B. 14: Simulação dinâmica dia 19 de setembro

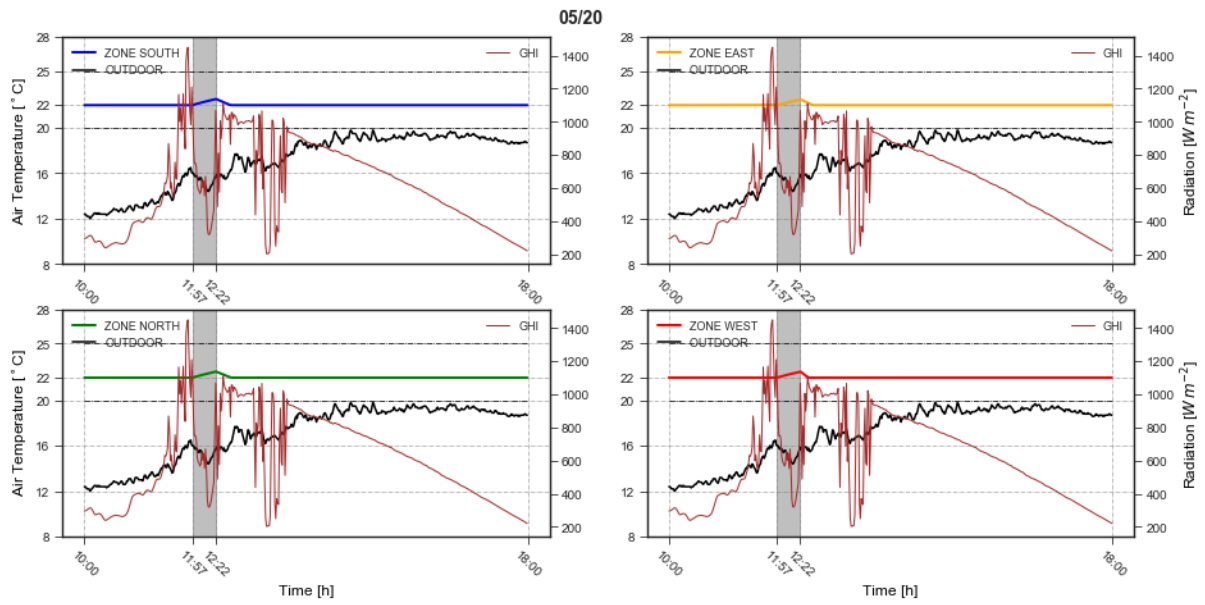


Figura B. 15: Simulação dinâmica dia 20 de maio

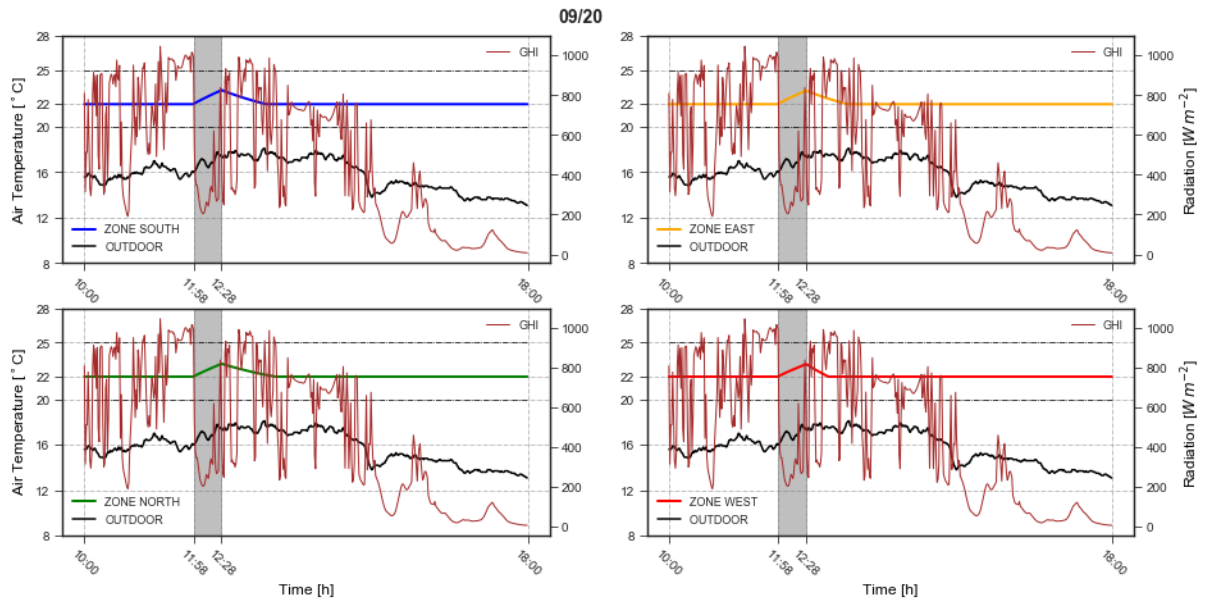


Figura B. 16: Simulação dinâmica dia 20 de setembro

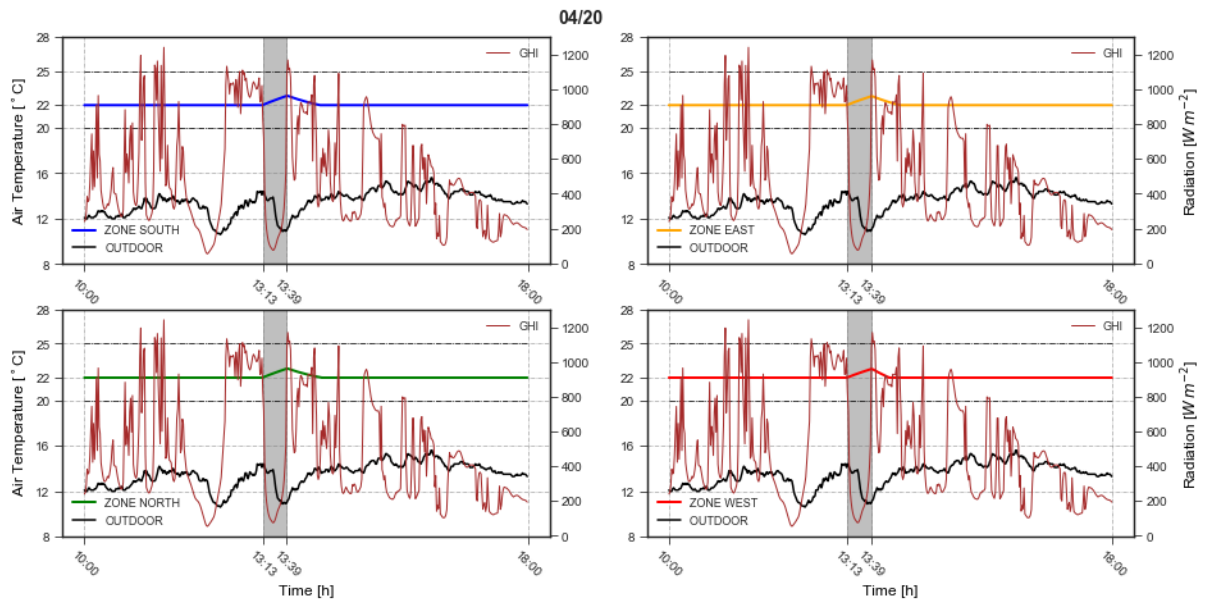


Figura B. 17: Simulação dinâmica dia 20 de abril

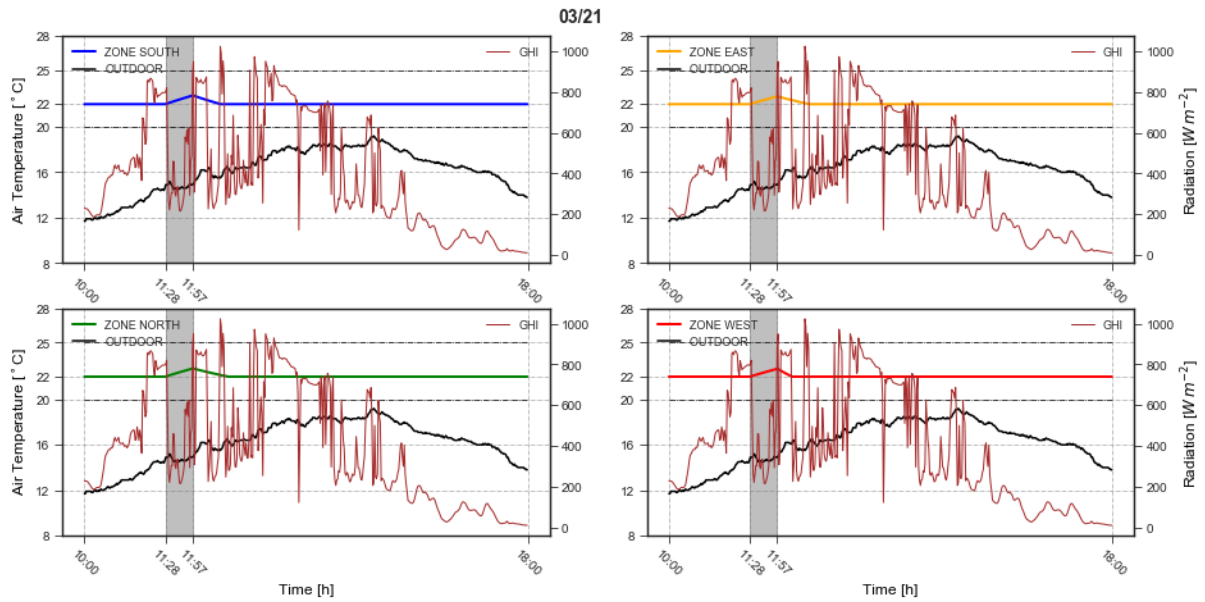


Figura B. 18: Simulação dinâmica dia 21 de março

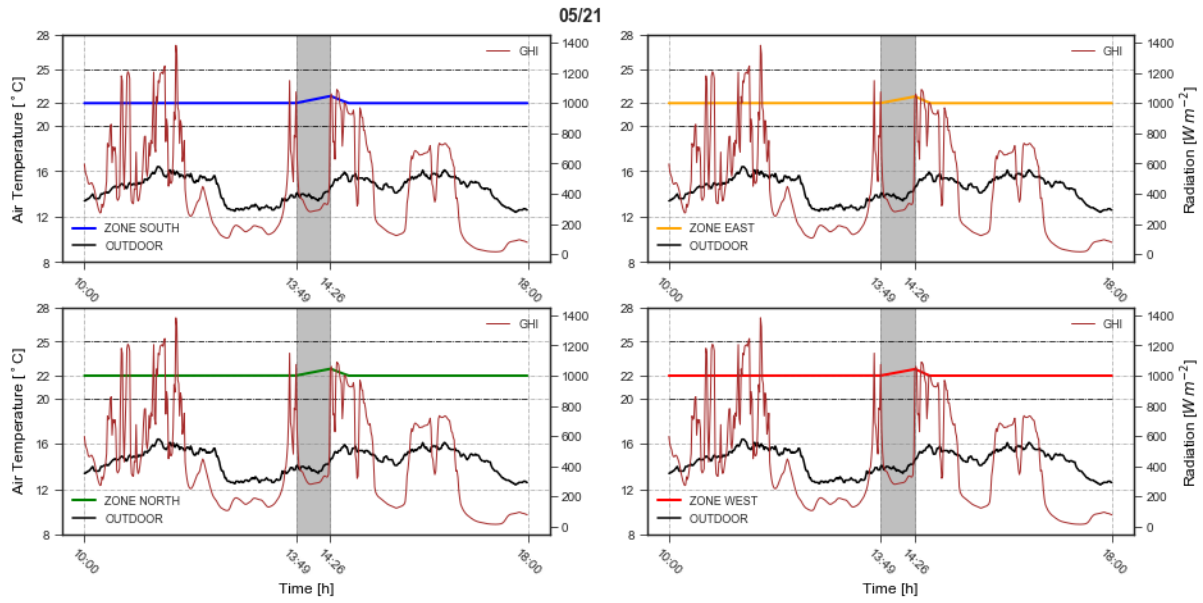


Figura B. 19: Simulação dinâmica dia 21 de maio

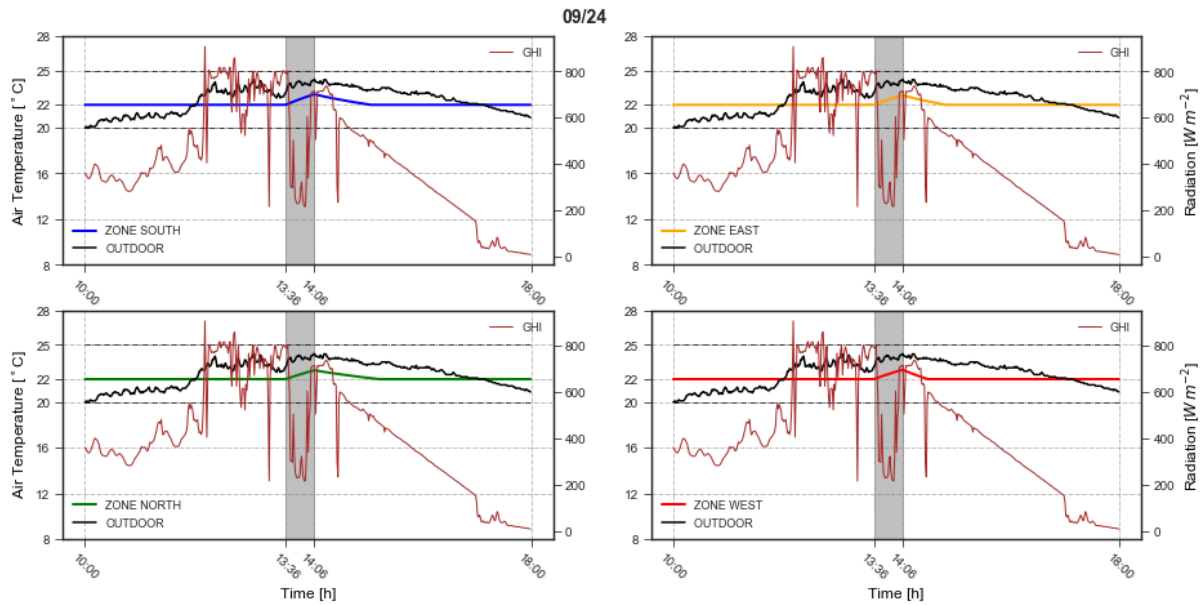


Figura B. 20: Simulação dinâmica dia 24 de setembro

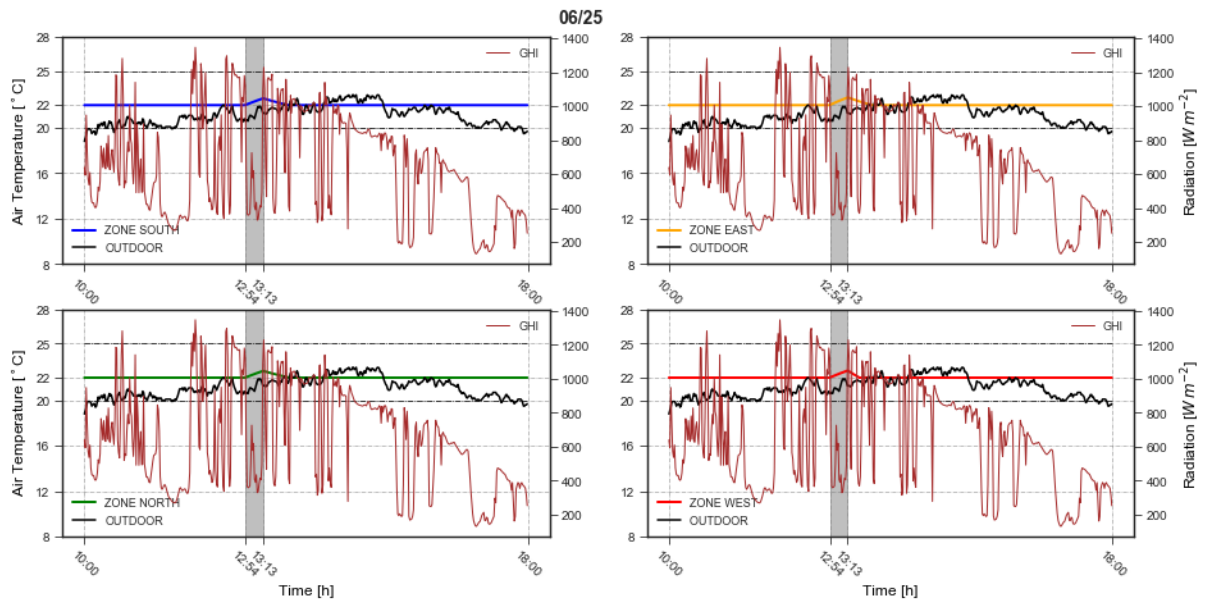


Figura B. 21: Simulação dinâmica dia 25 de junho

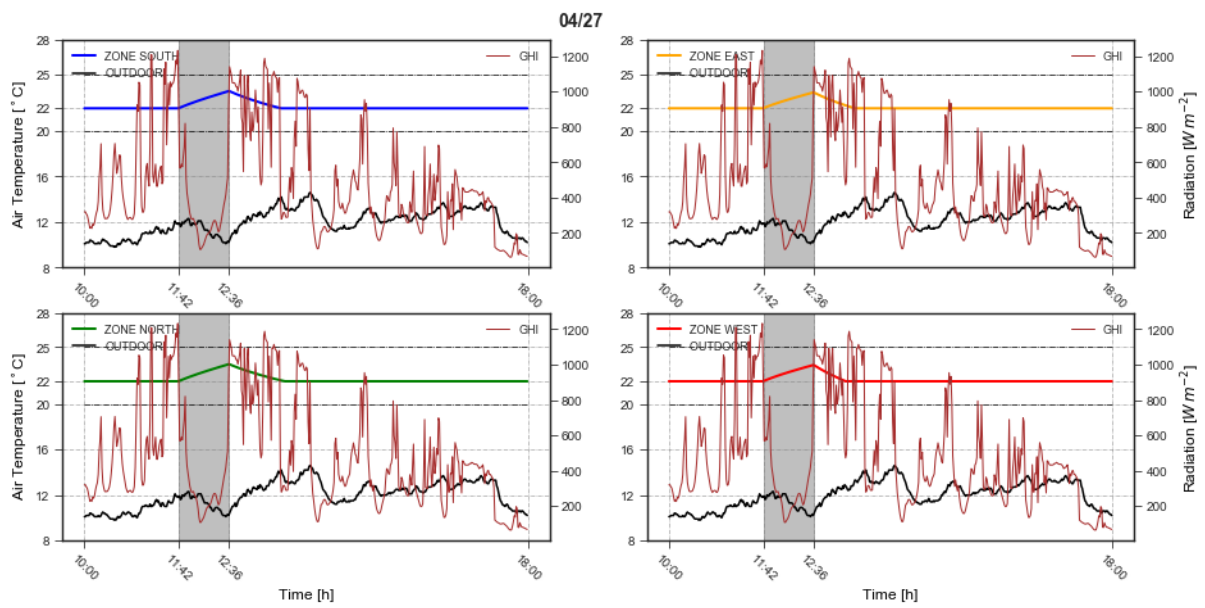


Figura B. 22: Simulação dinâmica dia 27 de abril

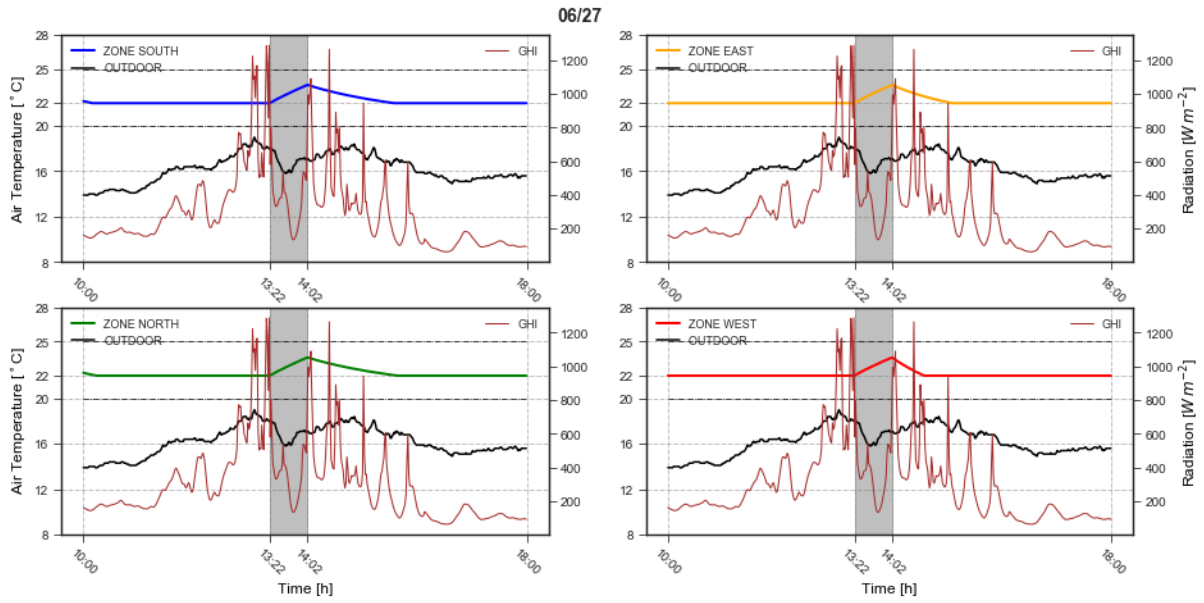


Figura B. 23: Simulação dinâmica dia 27 de junho

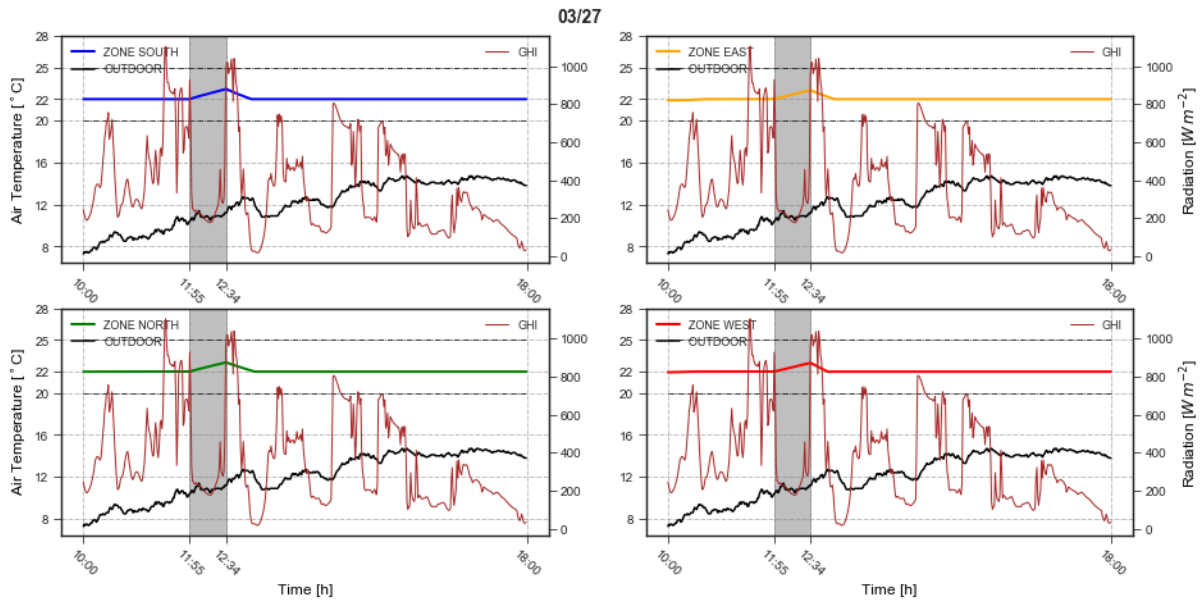


Figura B. 24: Simulação dinâmica dia 27 de março

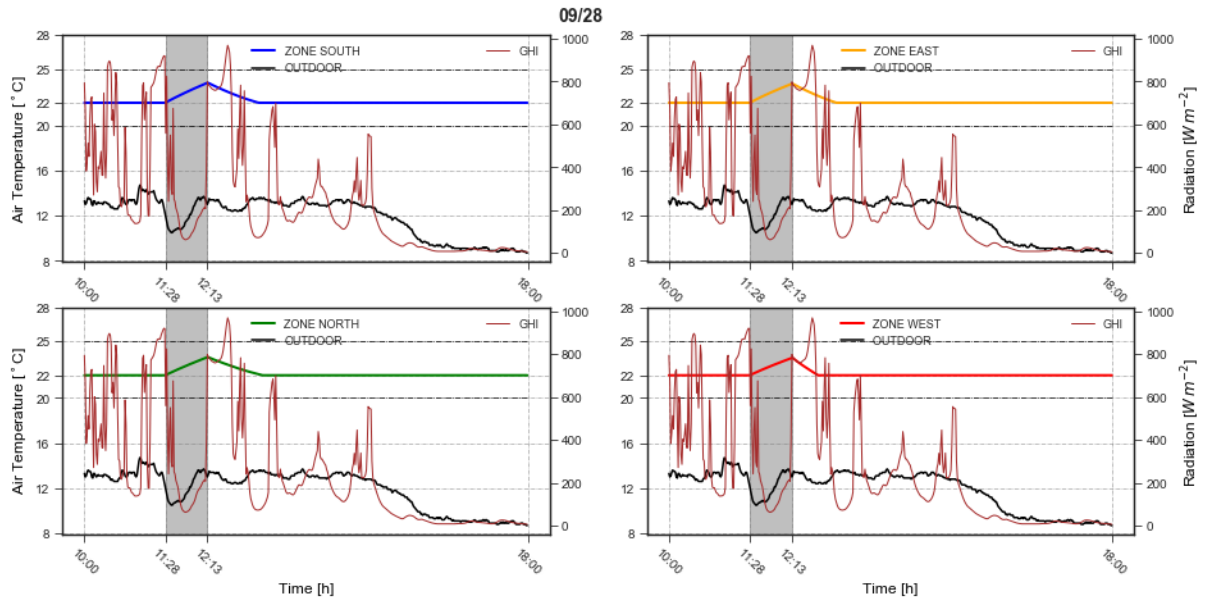


Figura B. 25: Simulação dinâmica dia 28 de setembro

Anexo C – Cenário 3 Figuras

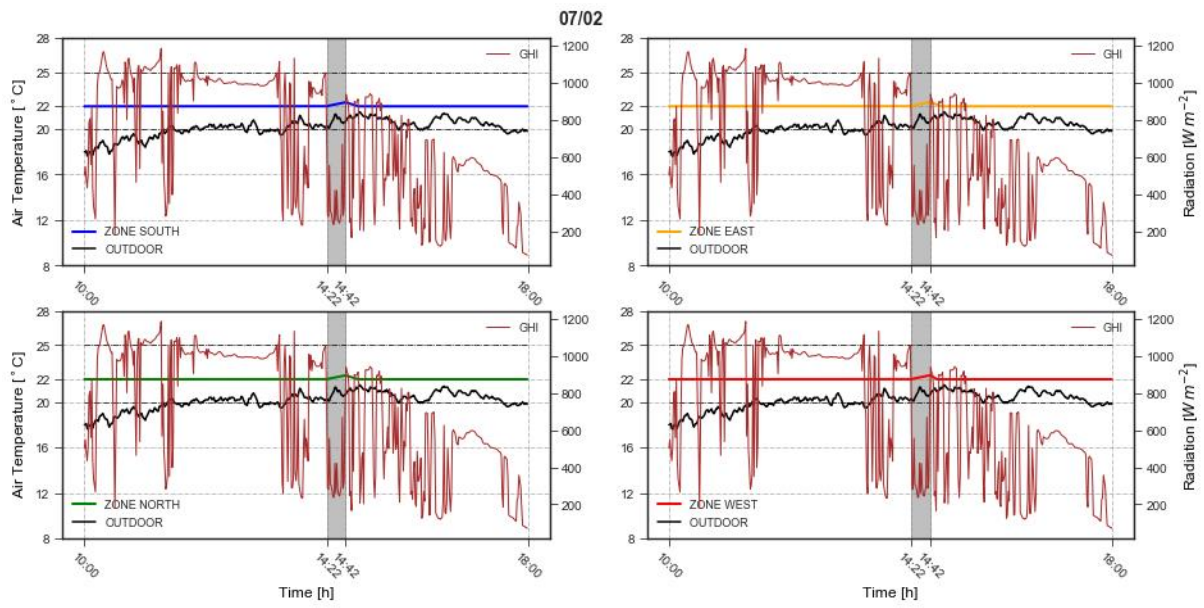


Figura C. 1: Simulação dinâmica dia 2 de julho

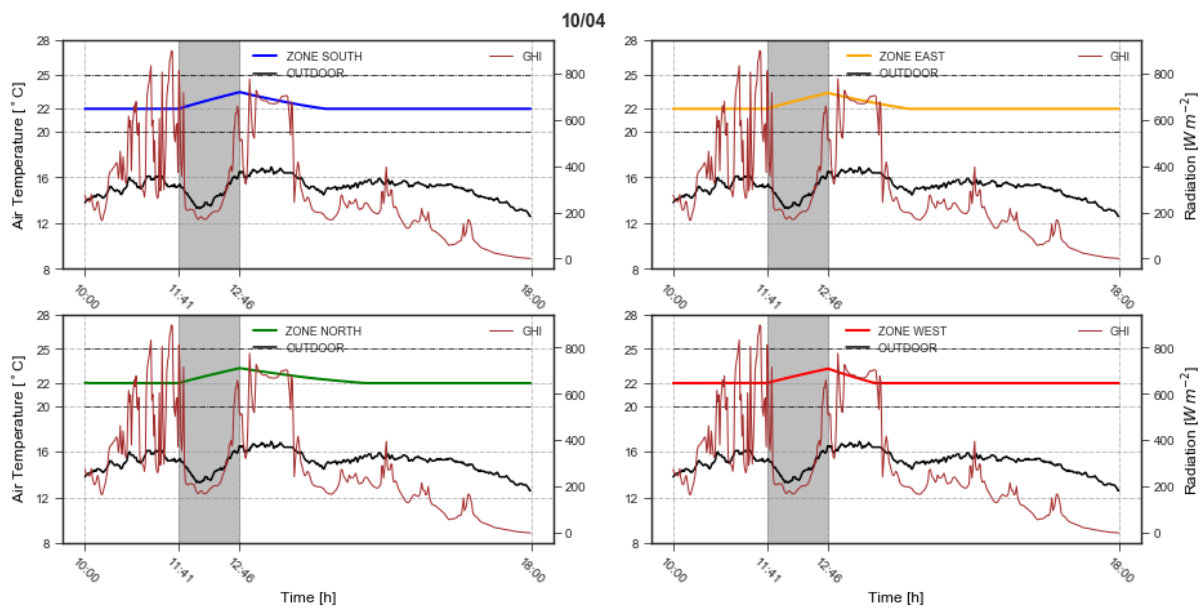


Figura C. 2: Simulação dinâmica dia 4 de outubro

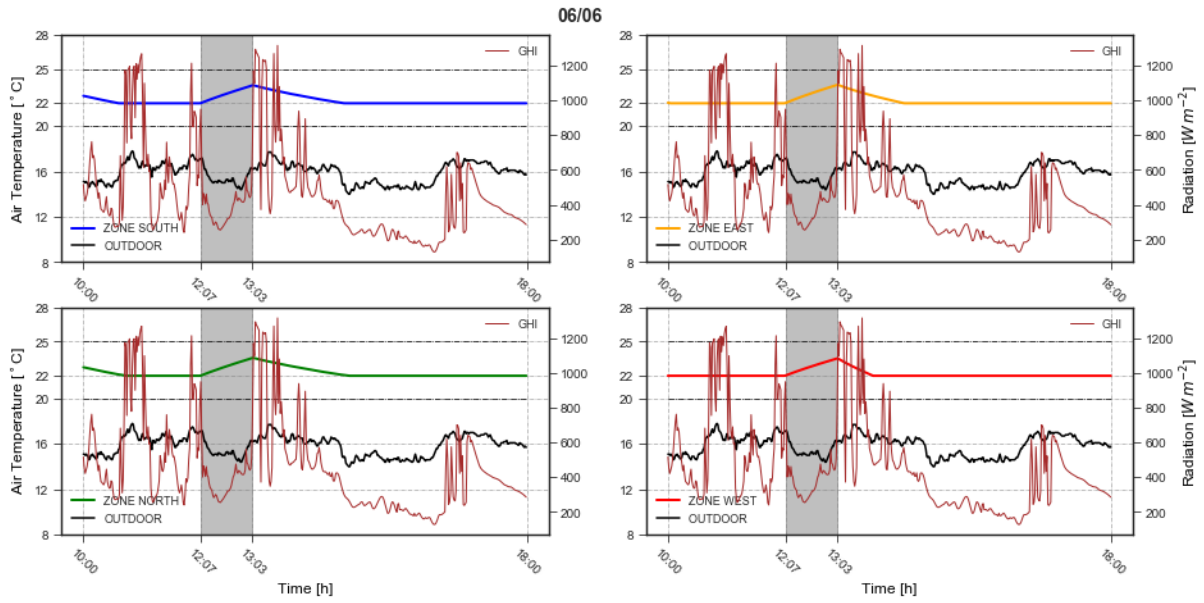


Figura C. 3: Simulação dinâmica dia 6 de junho

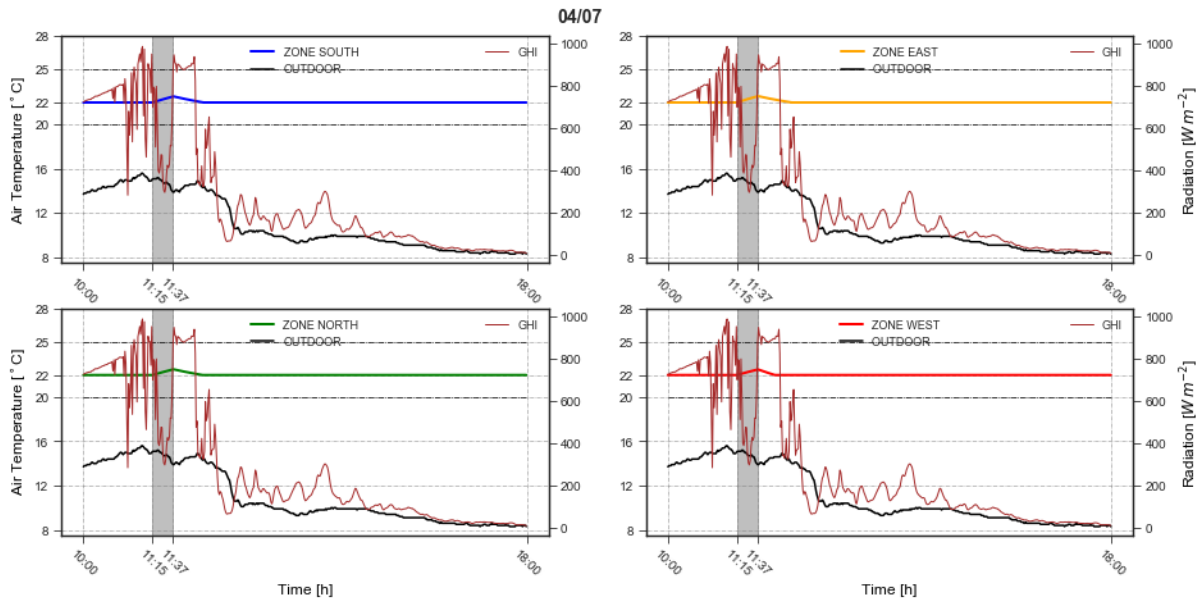


Figura C. 4: Simulação dinâmica dia 7 de abril

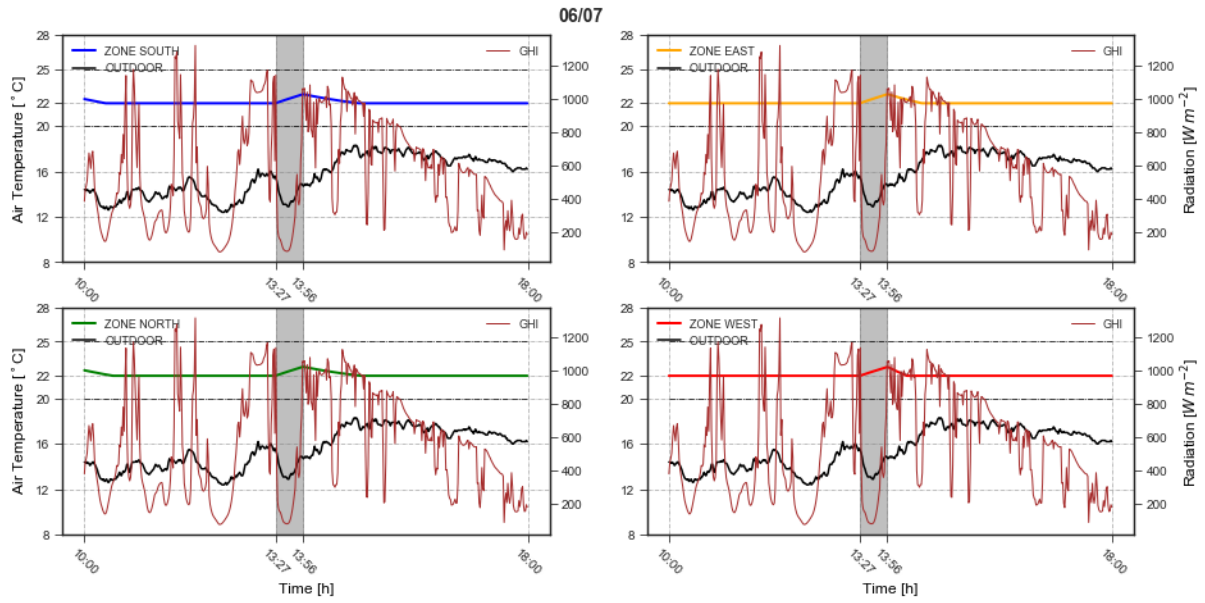


Figura C. 5: Simulação dinâmica dia 7 de junho

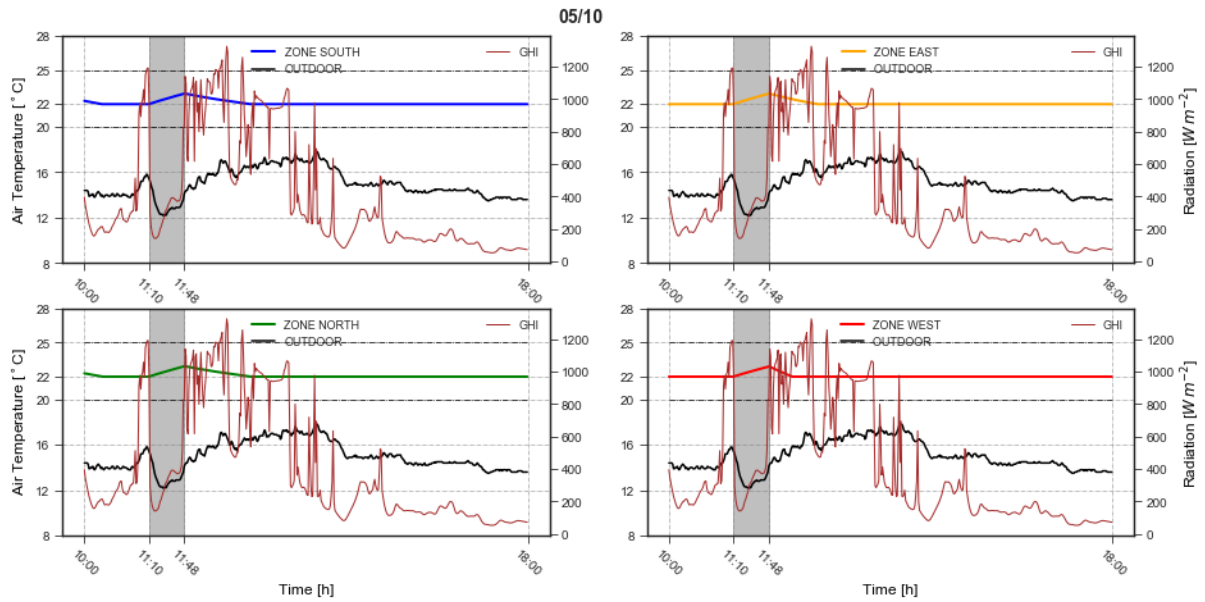


Figura C. 6: Simulação dinâmica dia 10 de maio

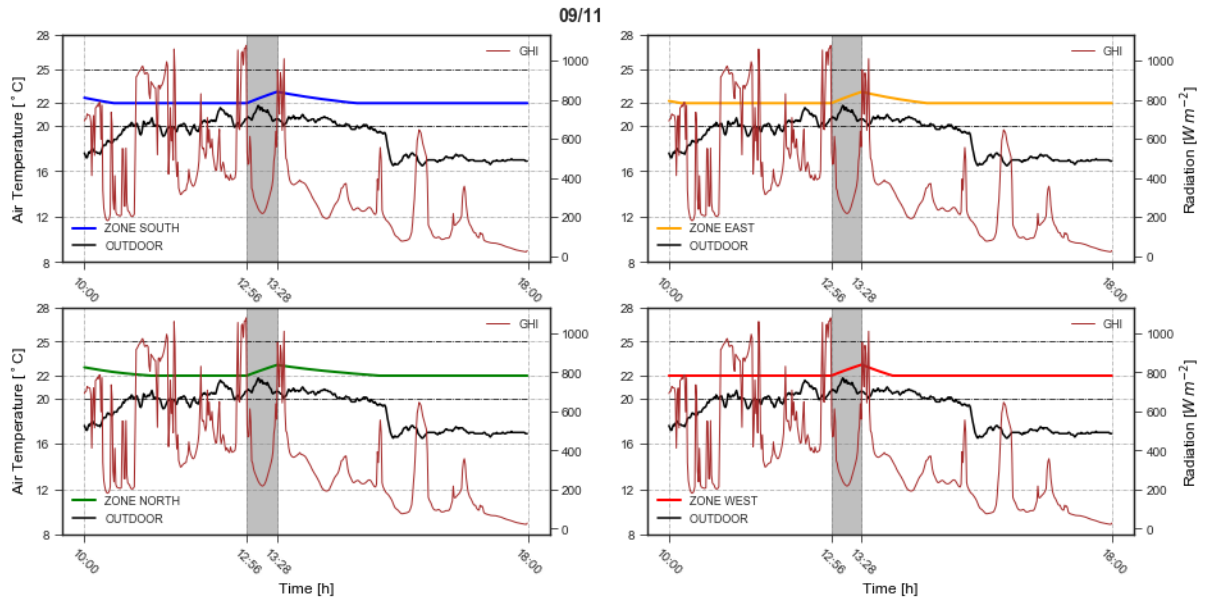


Figura C. 7: Simulação dinâmica dia 11 de setembro

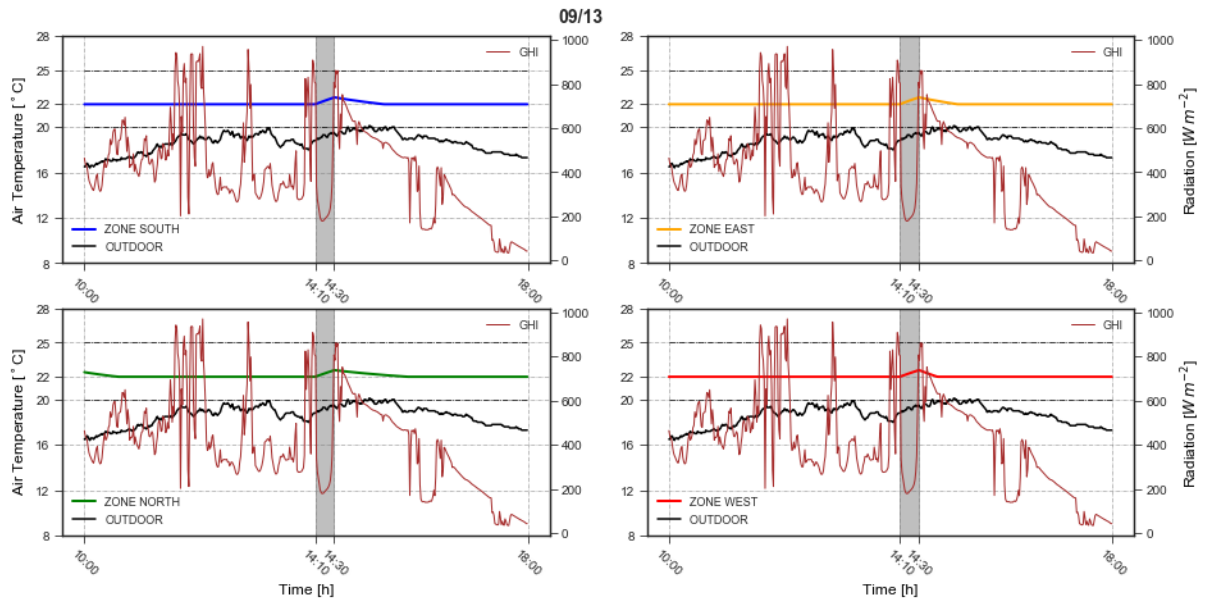


Figura C. 8: Simulação dinâmica dia 13 de setembro

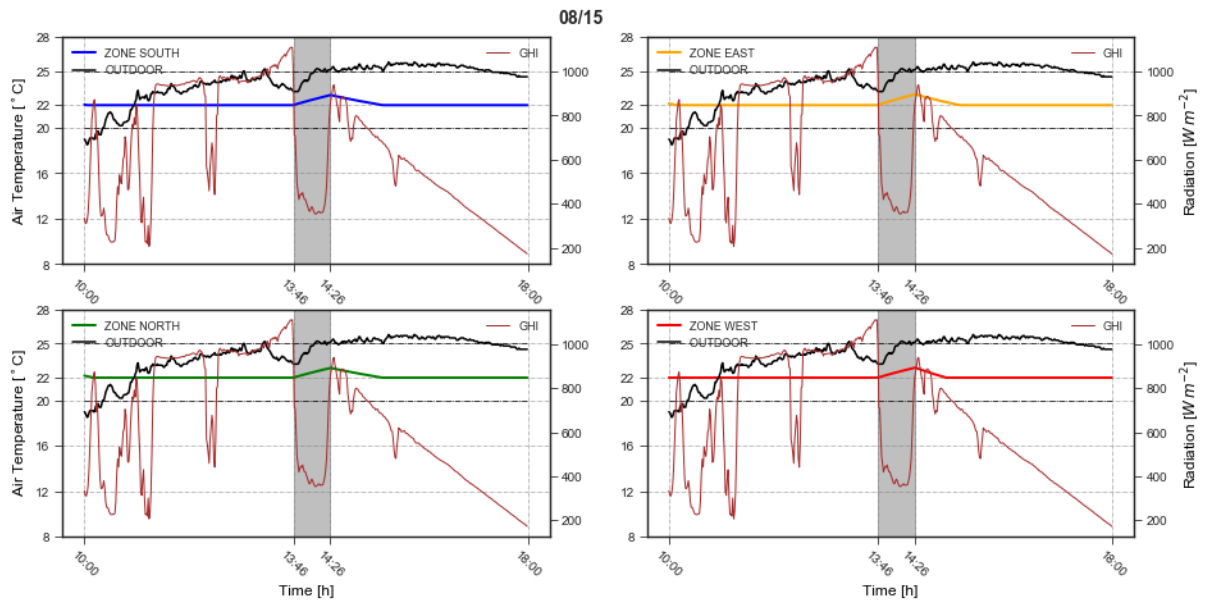


Figura C. 9: Simulação dinâmica dia 15 de agosto

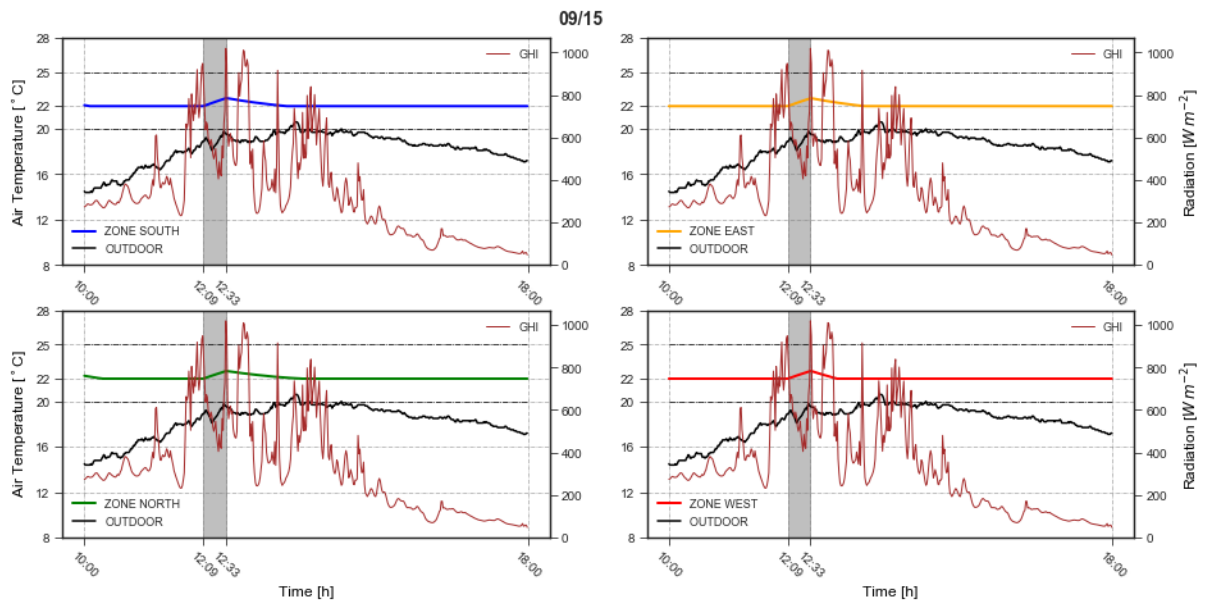


Figura C. 10: Simulação dinâmica dia 15 de setembro

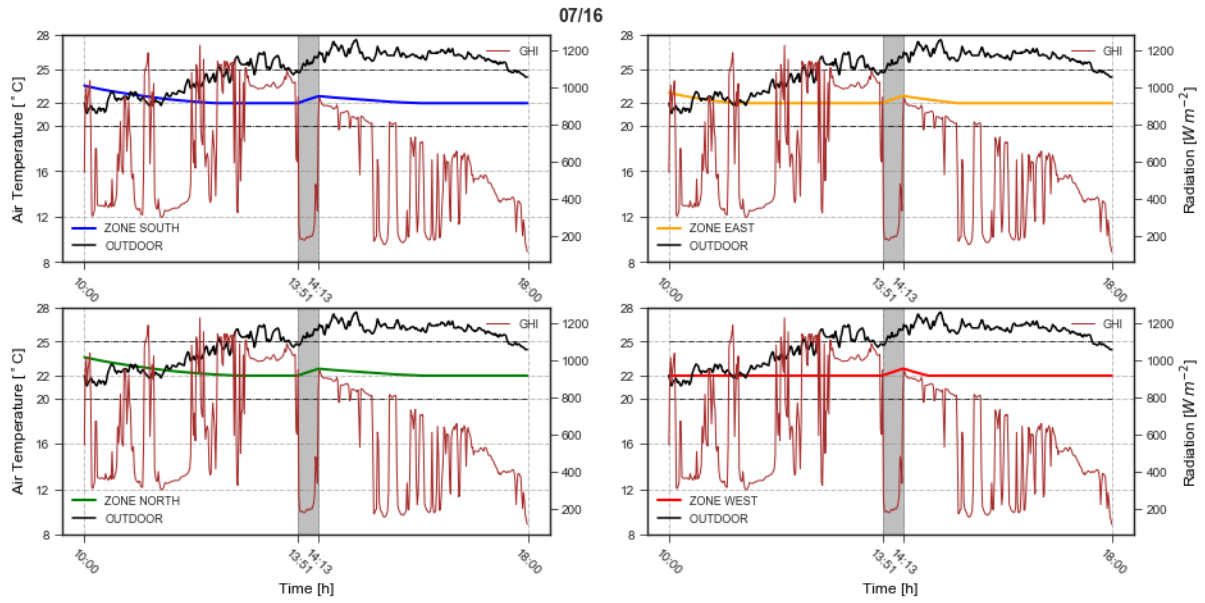


Figura C. 11: Simulação dinâmica dia 16 de julho

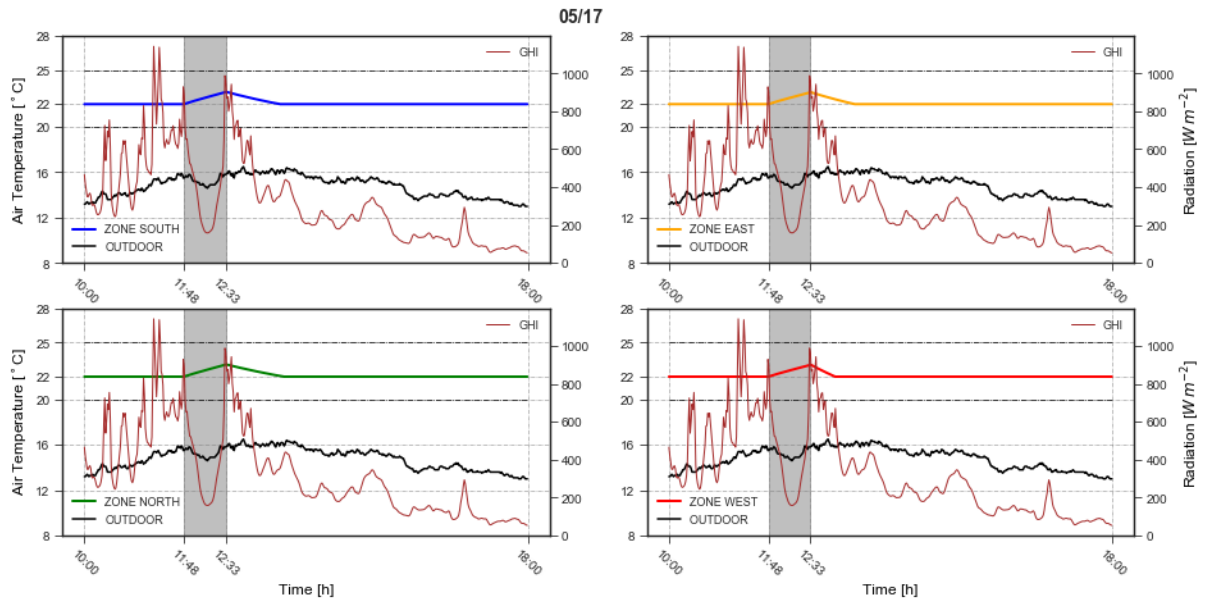


Figura C. 12: Simulação dinâmica dia 17 de maio

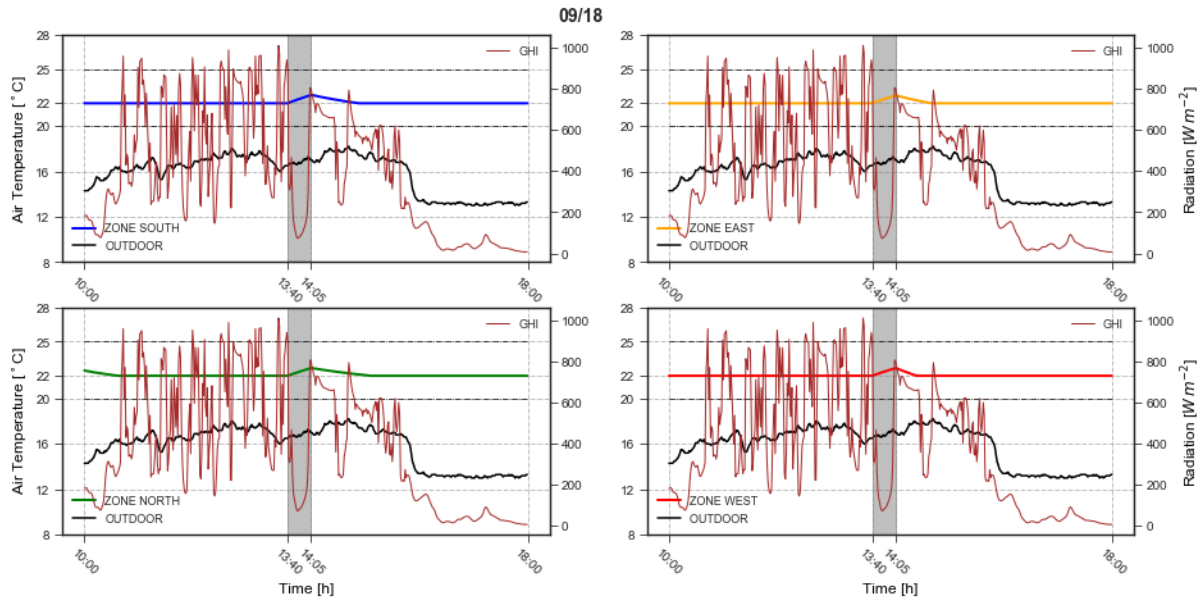


Figura C. 13: Simulação dinâmica dia 18 de setembro

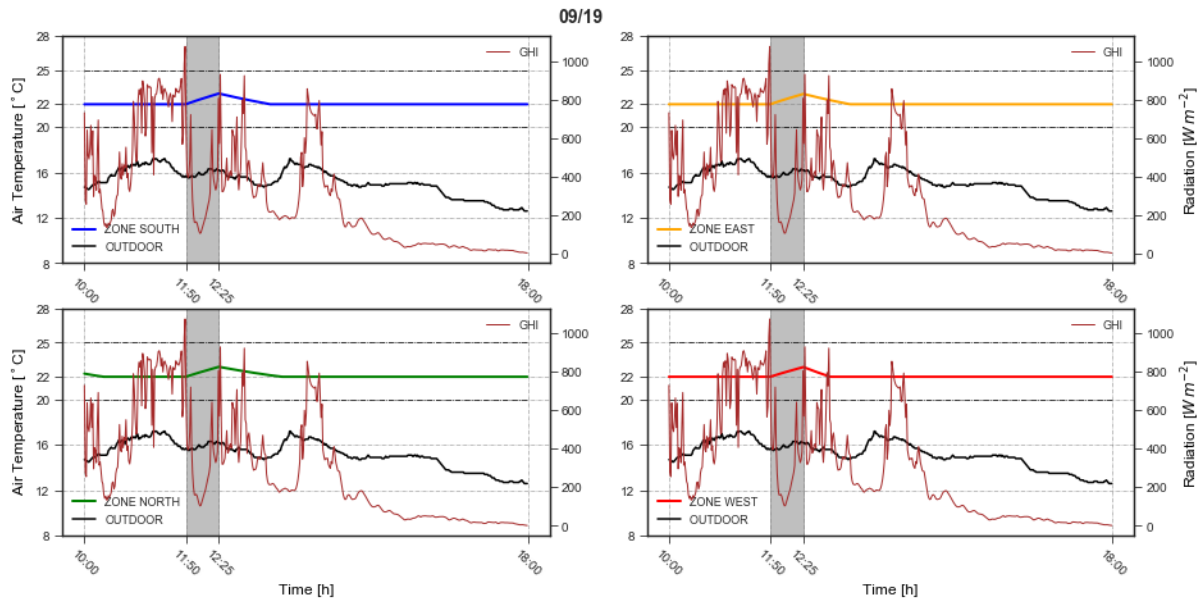


Figura C. 14: Simulação dinâmica dia 19 de setembro

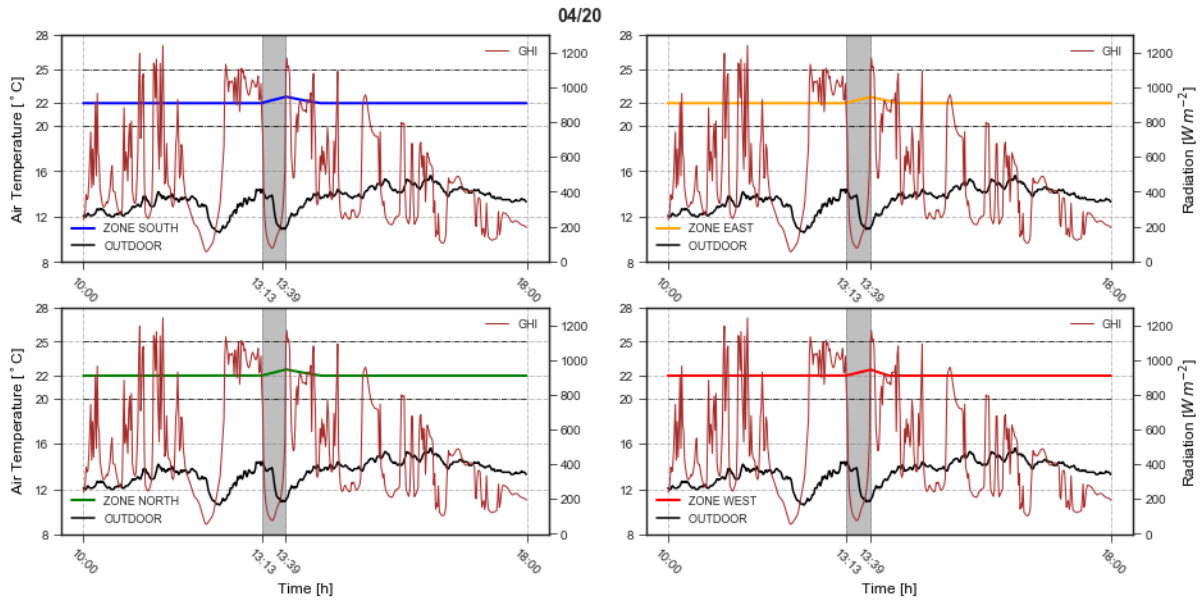


Figura C. 15: Simulação dinâmica dia 20 de abril

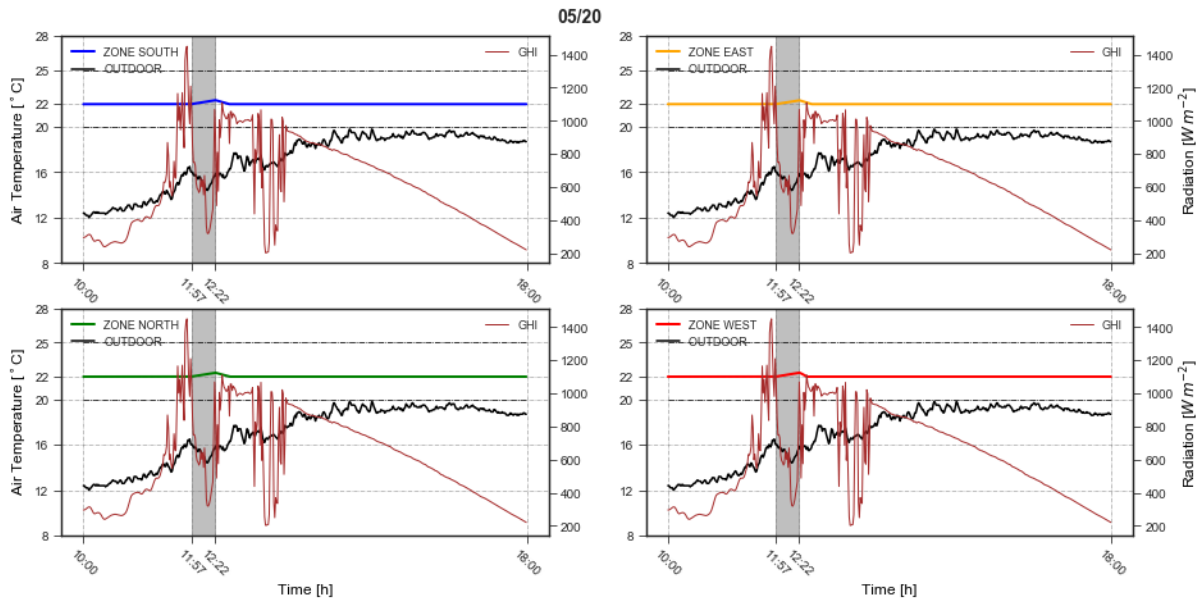


Figura C. 16: Simulação dinâmica dia 20 de maio

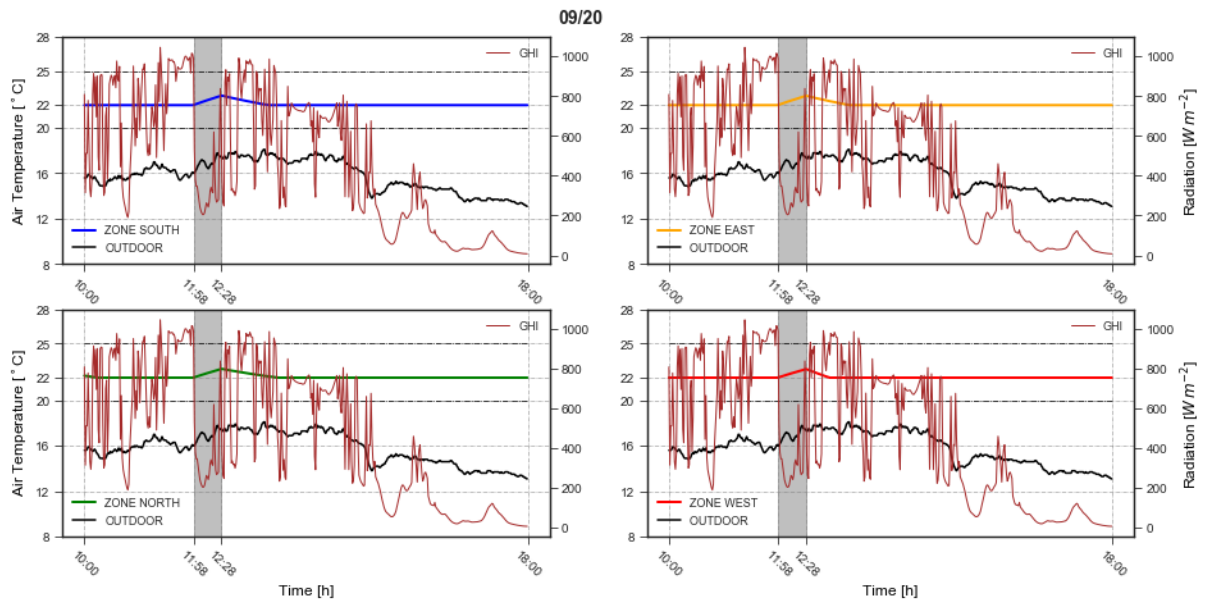


Figura C. 17: Simulação dinâmica dia 20 de setembro

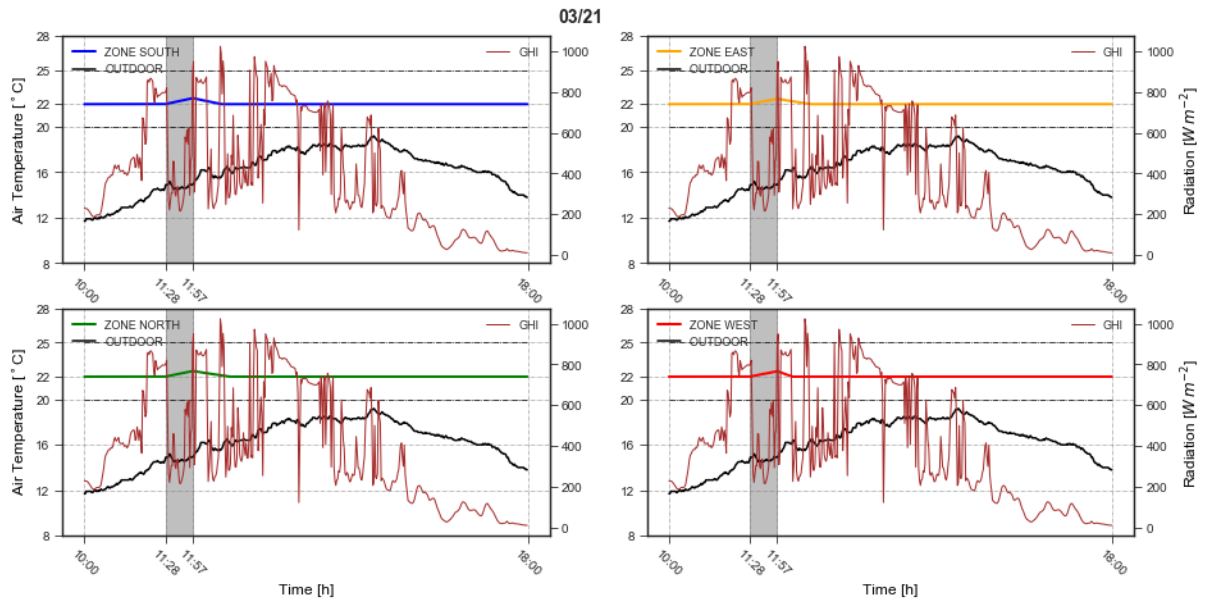


Figura C. 18: Simulação dinâmica dia 21 de março

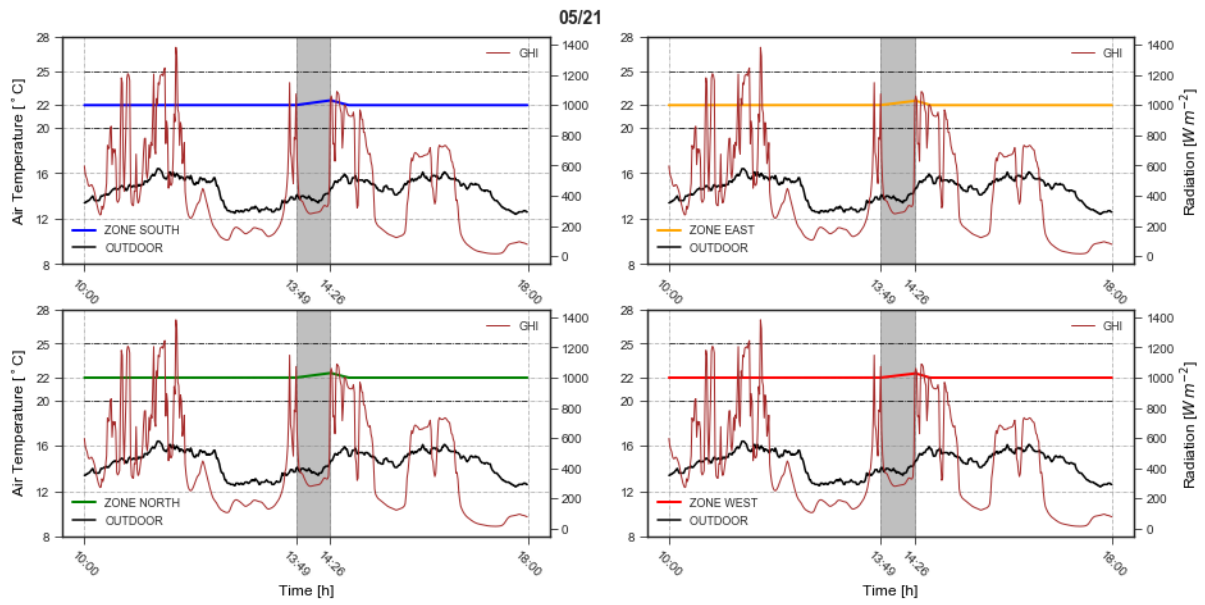


Figura C. 19: Simulação dinâmica dia 21 de maio

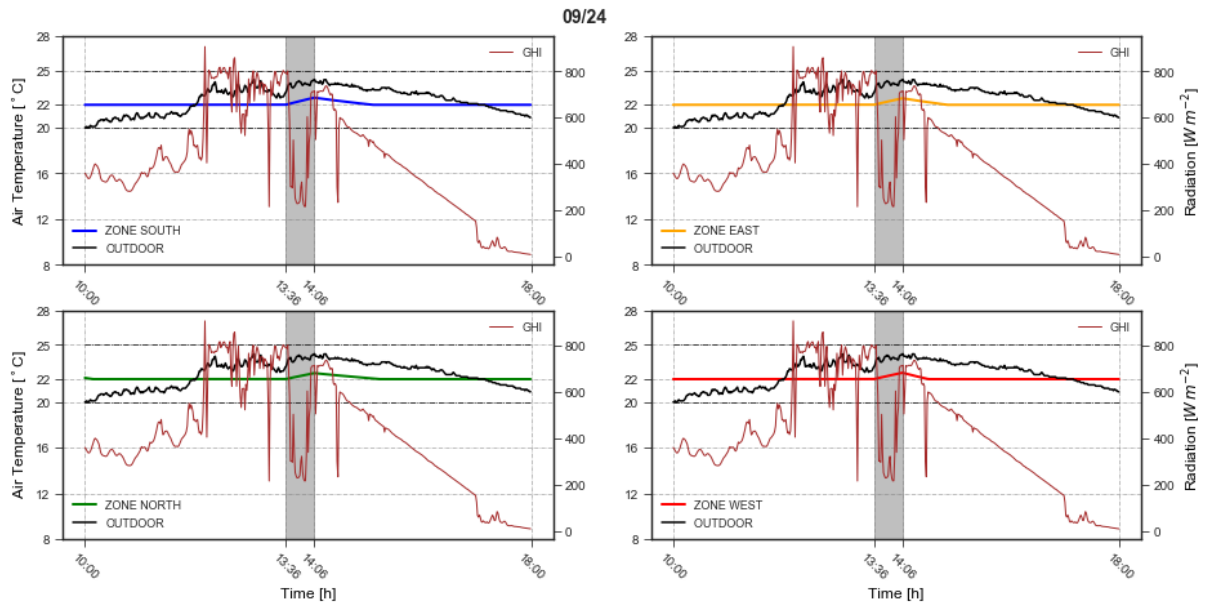


Figura C. 20: Simulação dinâmica dia 24 de setembro

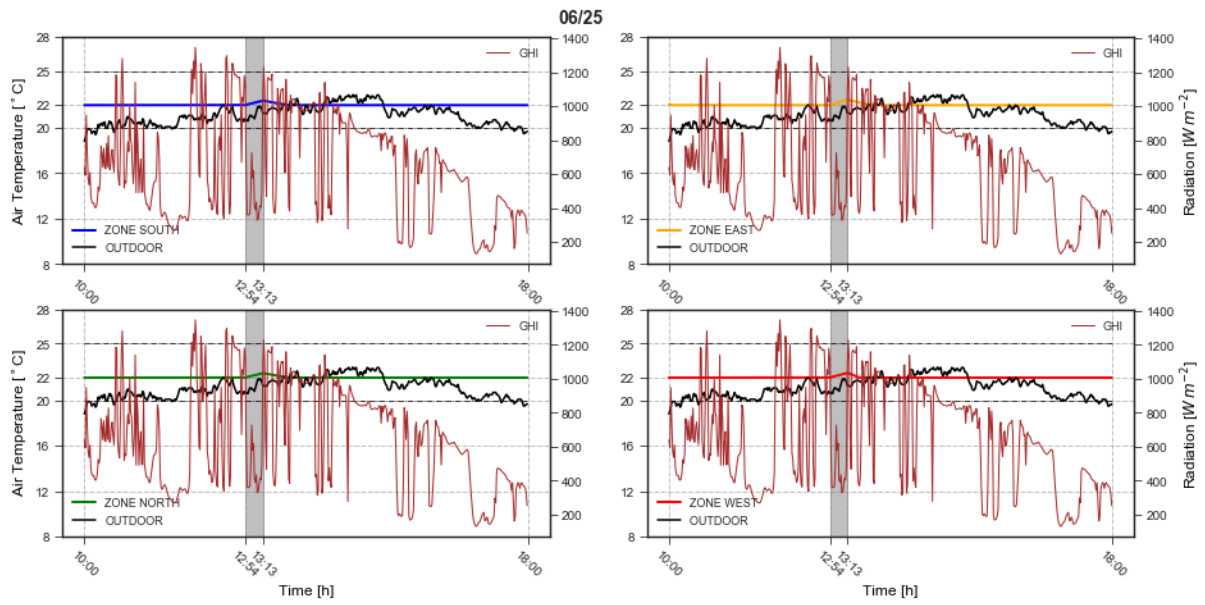


Figura C. 21: Simulação dinâmica dia 25 de junho

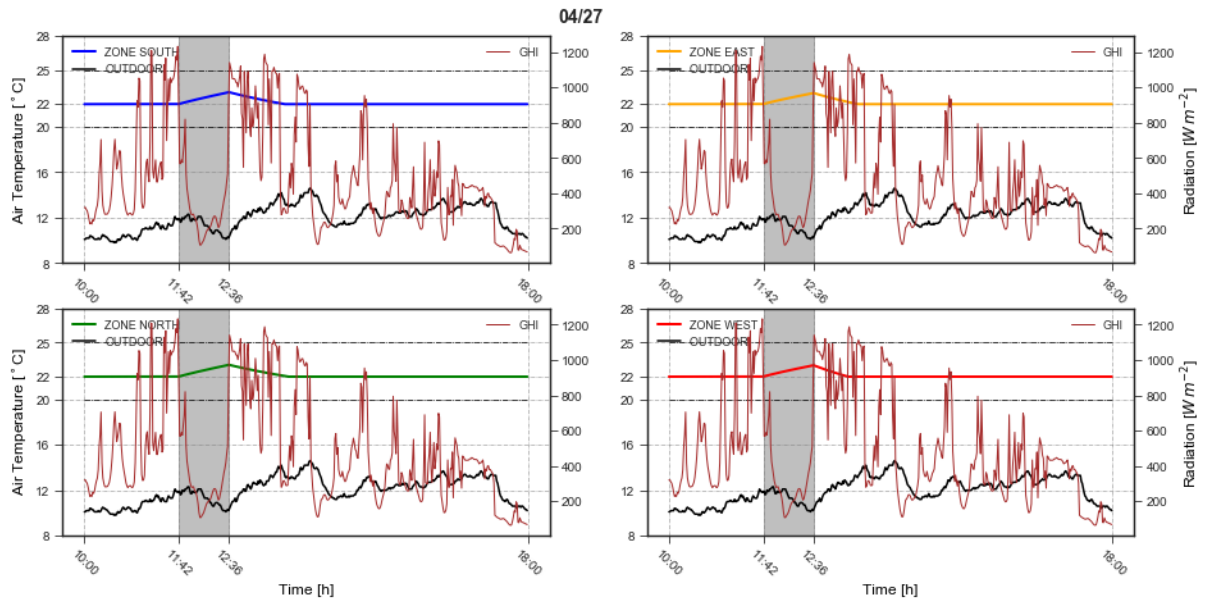


Figura C. 22: Simulação dinâmica dia 27 de abril

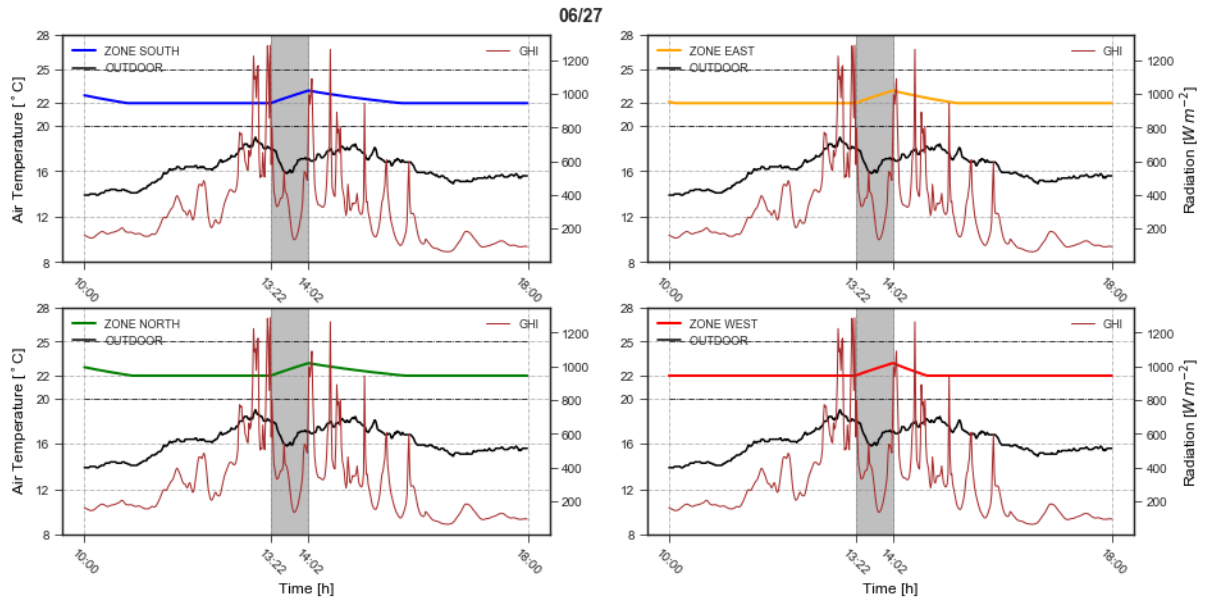


Figura C. 23: Simulação dinâmica dia 27 de junho

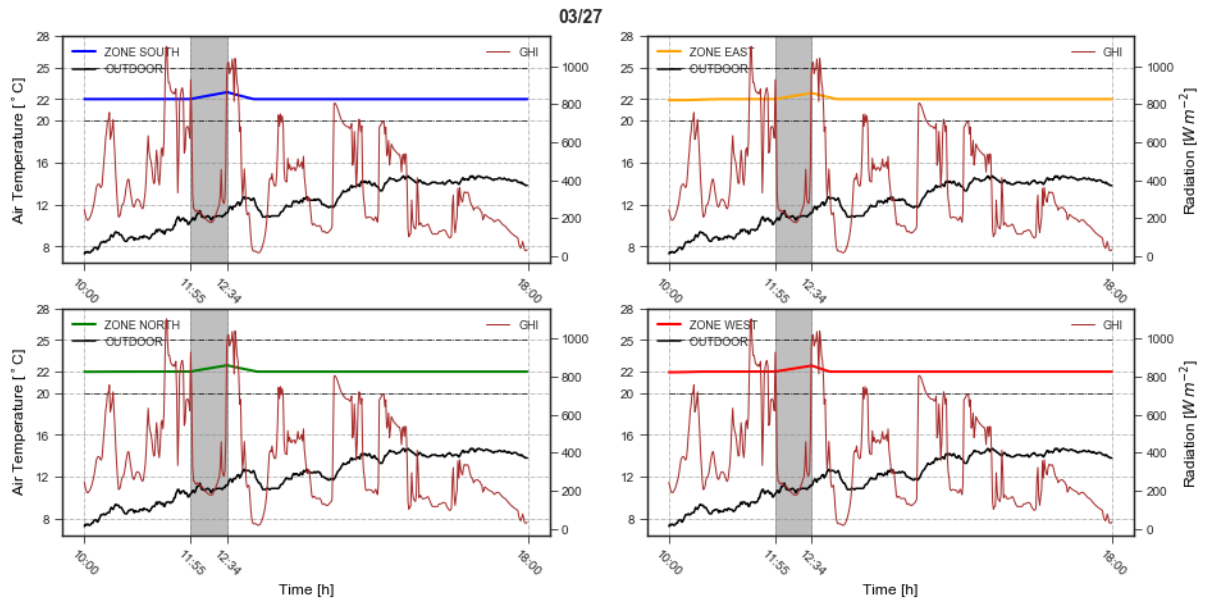


Figura C. 24: Simulação dinâmica dia 27 de abril

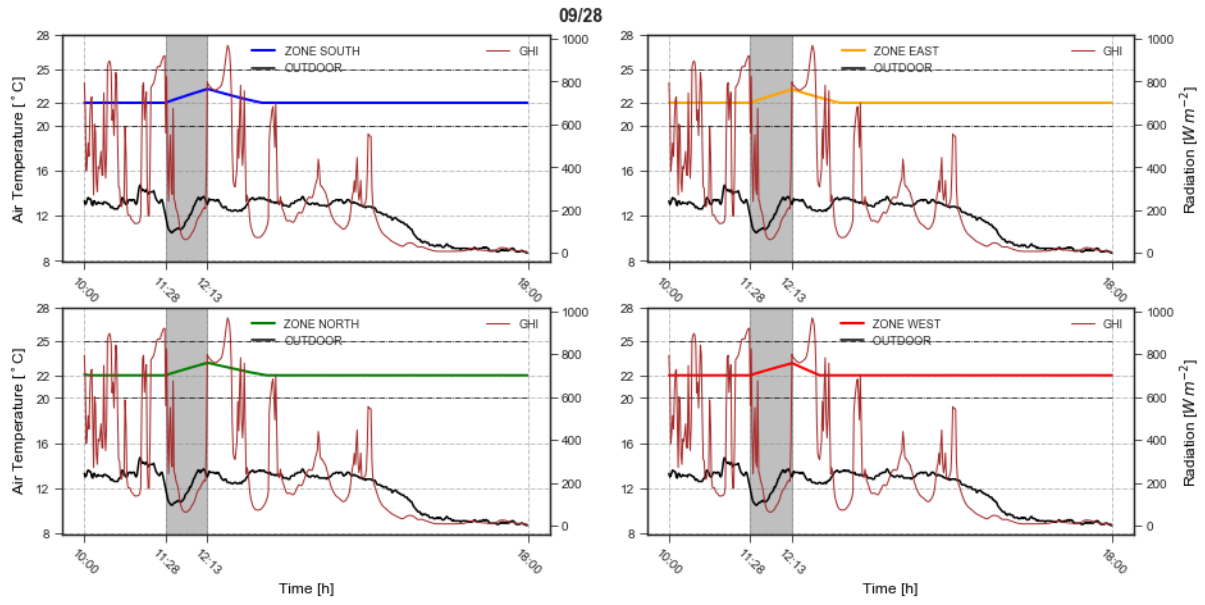


Figura C. 25: Simulação dinâmica dia 28 de setembro