UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

UFSC

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ENERGÉTICO DE UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL À ENERGIA NETO POSITIVA COM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE (SFVCR)

Giovani Almeida Dávi

Florianópolis, 08 de abril de 2013.

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ENERGÉTICO DE UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL À ENERGIA NETO POSITIVA COM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE (SFVCR)

> Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Ricardo Rüther, PhD

Florianópolis, 08 de abril de 2013.

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

Almeida Dávi, Giovani

Avaliação do comportamento energético de um edifício residencial à energia neto positiva com sistema solar fotovoltaico conectado à rede (SFVCR) / Giovani Almeida Dávi ; orientador, Ricardo Rüther ; co-orientador, Roberto Lamberts. - Florianópolis, SC, 2013.

174 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

 Engenharia Civil. 2. Edifícios à energia neto positiva. 3. Sistema solar fotovoltaico.
 Distribuição de energia elétrica. I. Rüther, Ricardo. II. Lamberts, Roberto. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Giovani Almeida Dávi

Dissertação julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

> Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, PhD Coordenador do PPGEC

Prof. Ricardo Rüther, PhD – PPGEC/UFSC Orientador e Presidente da Comissão Julgadora

Prof. Roberto Lamberts, PhD - PPGEC/UFSC

Prof. Prof. Roberto Zilles, PhD – IEE/USP

Prof. Fernando Ruttkay Pereira, PhD – PósARQUI/UFSC

Prof. José Ripper Kós, PhD – PósARQUI/UFSC

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar o carisma e a confiança de meus pais e amigos para a elaboração deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Ricardo Rüther, pelas sugestões, experiências repassadas e pela dedicação dispensada.

Agradeço ao Prof. Zilles, pela oportunidade e apoio no desenvolvimento do projeto do sistema solar FV da edificação.

Gostaria de agradecer meus colegas do Laboratório de Sistema Fotovoltaicos (LSF) da Universidade de São Paulo pelo apoio técnico na construção e operação do sistema solar fotovoltaico.

Aos colegas e coordenadores do projeto Ekó house. Agradeço a oportunidade concebida pelo Prof. Lamberts, Prof. Kós e Prof^a. Themis.

Aos colegas do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC.

RESUMO

DÁVI, G.A. Avaliação do comportamento energético de um edifício residencial à energia neto positiva com sistema solar fotovoltaico conectado à rede (SFVCR). 2012. 174 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina.

Este trabalho determina o comportamento energético de um edifício residencial à energia neto positiva nas condições climáticas de Madri, Espanha. O trabalho resume os procedimentos experimentais adotados nas medições dos parâmetros de desempenho de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica (SFVCR) no estudo de caso proposto. Avalia a distribuição diária e anual de energia elétrica analisando a interação entre o sistema solar fotovoltaico, a carga elétrica e a rede elétrica. Também compara a geração e produtividade fotovoltaica e a correlação temporal de geração-consumo entre cinco edificações da competição Solar Decathlon. Através de simulações computacionais no programa EnergyPlus são realizadas análises de desempenho operacional do sistema solar fotovoltaico, assim como de consumo de energia elétrica da edificação. Comparações paramétricas entre dois modelos verificam resultados dos testes de compatibilidade entre o caso real e simulado.

Palavras-chave: Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede elétrica (SFVCR), Edifício à energia neto positiva, Solar Decathlon, Distribuição de energia elétrica.

ABSTRACT

DÁVI, G.A. **Positive-net-energy residential building energy performance evaluation with grid-connected photovoltaic system.** 2012. 174 p. M.Sc. Diss. PostGraduate Program in Civil Engineering. Federal University of Santa Catarina.

This work determines the energetic behavior of a positive-net-energy residential building in Spain conditions. It summarizes experimental procedures adopted to measure grid-connected photovoltaic system performance parameter in the proposed case study. It investigates the daily and annual distribution of electrical energy analyzing the interaction between the PV system, electric charge and electric power grid. It also compares PV generation, final yield and temporary generation-consumption correlation between five buildings of the Solar Decathlon competition. Through EnergyPlus software simulations are performed grid-connected PV system operational performance analysis, as well as building electrical energy consumption analysis. Parametric comparisons between two models verify compatibility test results between the real and simulated case.

Keywords: Grid-Connected Photovoltaic System, Positive-net-energy building, Solar Decathlon, Electrical energy distribution.

LISTA DE FIGURAS

(TWh) (Outros (3,7%) inclui as fontes geotérmica, solar, eólica e os biocombustíveis). (b) Consumo por fonte (Mtoe) (Outros (3,4%) inclui as fontes geotérmica, solar, eólica, etc.). Fonte: IEA (2012). 29 Figura 2. Taxa média anual de crescimento de produção de energia com fontes de energia renováveis no mundo entre 2006 e 2011 (REPN, 2012). 29 Figura 3. Capacidade instalada total de energias renováveis (GW) em 2011 excluindo a energia hidroelétrica (REPN, 2012). 31 Figura 4. Espectro solar no espaço e na superfície terrestre AM 1,5 e γ _S de 41,8°. Fonte: Quaschning (modificado). 33 Figura 5. Potência instalada acumulada (GW) de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no mundo. Fonte: EPIA (2012). 35 Figura 6. Esquema de instalações fotovoltaicas conectadas à rede elétrica (RIFFONNEAU et al., 2008) (adaptado). 36 Figura 7. Processo de conversão de energia no inversor. 42 Figura 8. Curva de eficiência do inversor SMA SMC 5000A em função da potência elétrica de saída. Fonte: SunPower Corporation. 43 Figura 9. Medidas de eficiência energética aplicadas a edifícios à energia zero conforme escopo do IEA Task 40/Annex 52 " <i>Towards Net Zero Energy Solar Buildings</i> " (MUSALL et al., 2011) (adaptado). 49 Figura 11. Solar Decathlon Europa edição 2012, Madri. 51 <	Figura 1. Balanço energético mundial: (a) Geração energia elétrica por fonte
biocombustíveis). (b) Consumo por fonte (Mtoe) (Outros (3,4%) inclui as fontes geotérmica, solar, eólica, etc.). Fonte: IEA (2012)	(TWh) (Outros (3,7%) inclui as fontes geotérmica, solar, eólica e os
geotérmica, solar, eólica, etc.). Fonte: IEA (2012). 29 Figura 2. Taxa média anual de crescimento de produção de energia com fontes de energia renováveis no mundo entre 2006 e 2011 (REPN, 2012). 29 Figura 3. Capacidade instalada total de energias renováveis (GW) em 2011 excluindo a energia hidroelétrica (REPN, 2012). 31 Figura 4. Espectro solar no espaço e na superfície terrestre AM 1,5 e y _S de 41,8°. Fonte: Quaschning (modificado). 33 Figura 5. Potência instalada acumulada (GW) de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no mundo. Fonte: EPIA (2012). 35 Figura 6. Esquema de instalações fotovoltaicas conectadas à rede elétrica (RIFFONNEAU et al., 2008) (adaptado). 36 Figura 7. Processo de conversão de energia no inversor. 42 Figura 8. Curva de eficiência do inversor SMA SMC 5000A em função da potência elétrica de saída. Fonte: SunPower Corporation. 43 Figura 9. Medidas de eficiência energética aplicadas a edifícios à energia zero conforme escopo do IEA Task 40/Annex 52 " <i>Towards Net Zero Energy Solar</i> 90 Buildings" (MUSALL et al., 2011) (adaptado). 49 91 91 91 Figura 11. Solar Decathlon Europa edição 2012, Madri. 50 91 91 Figura 12. Esquerda: Casa solar Ekó concluída no parque da competição Solar 56 57 57	biocombustíveis). (b) Consumo por fonte (Mtoe) (Outros (3,4%) inclui as fontes
Figura 2. Taxa média anual de crescimento de produção de energia com fontes de energia renováveis no mundo entre 2006 e 2011 (REPN, 2012)	geotérmica, solar, eólica, etc.). Fonte: IEA (2012)
de energia renováveis no mundo entre 2006 e 2011 (REPN, 2012)	Figura 2. Taxa média anual de crescimento de produção de energia com fontes
Figura 3. Capacidade instalada total de energias renováveis (GW) em 2011 excluindo a energia hidroelétrica (REPN, 2012)	de energia renováveis no mundo entre 2006 e 2011 (REPN, 2012)
excluindo a energia hidroelétrica (REPN, 2012)	Figura 3. Capacidade instalada total de energias renováveis (GW) em 2011
Figura 4. Espectro solar no espaço e na superfície terrestre AM 1,5 e γ _S de 41,8°. Fonte: Quaschning (modificado). 33 Figura 5. Potência instalada acumulada (GW) de sistemas fotovoltaicos 35 conectados à rede no mundo. Fonte: EPIA (2012). 35 Figura 6. Esquema de instalações fotovoltaicas conectadas à rede elétrica (RIFFONNEAU et al., 2008) (adaptado). 36 Figura 7. Processo de conversão de energia no inversor. 42 Figura 8. Curva de eficiência do inversor SMA SMC 5000A em função da 43 potência elétrica de saída. Fonte: SunPower Corporation. 43 Figura 9. Medidas de eficiência energética aplicadas a edifícios à energia zero 44 conforme escopo do IEA Task 40/Annex 52 " <i>Towards Net Zero Energy Solar</i> 49 Figura 10. Competição Solar Decathlon Europa, 2010, Madri. Fotografia: José 50 Figura 11. Solar Decathlon Europa edição 2012, Madri. 51 Figura 13. Planta baixa da edificação. 56 Figura 14. Detalhes construtivos da Casa Ekó. Fonte: <i>Project drawings</i> do 58 Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon 58 Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon 58 Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon 58	excluindo a energia hidroelétrica (REPN, 2012)
41,8°. Fonte: Quaschning (modificado). 33 Figura 5. Potência instalada acumulada (GW) de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no mundo. Fonte: EPIA (2012). 35 Figura 6. Esquema de instalações fotovoltaicas conectadas à rede elétrica (RIFFONNEAU et al., 2008) (adaptado). 36 Figura 7. Processo de conversão de energia no inversor. 42 Figura 8. Curva de eficiência do inversor SMA SMC 5000A em função da potência elétrica de saída. Fonte: SunPower Corporation. 43 Figura 9. Medidas de eficiência energética aplicadas a edifícios à energia zero conforme escopo do IEA Task 40/Annex 52 " <i>Towards Net Zero Energy Solar Buildings</i> " (MUSALL et al., 2011) (adaptado). 49 Figura 10. Competição Solar Decathlon Europa, 2010, Madri. Fotografia: José 50 Figura 11. Solar Decathlon Europa edição 2012, Madri. 51 Figura 12. Esquerda: Casa solar Ekó concluída no parque da competição Solar 56 Figura 13. Planta baixa da edificação. 56 Figura 14. Detalhes construtivos da Casa Ekó. Fonte: <i>Project drawings</i> do 58 Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon 58 Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon 58 Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon 58	Figura 4. Espectro solar no espaço e na superfície terrestre AM 1,5 e γ_S de
Figura 5. Potência instalada acumulada (GW) de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no mundo. Fonte: EPIA (2012). 35 Figura 6. Esquema de instalações fotovoltaicas conectadas à rede elétrica (RIFFONNEAU et al., 2008) (adaptado). 36 Figura 7. Processo de conversão de energia no inversor. 42 Figura 8. Curva de eficiência do inversor SMA SMC 5000A em função da 43 potência elétrica de saída. Fonte: SunPower Corporation. 43 Figura 9. Medidas de eficiência energética aplicadas a edifícios à energia zero 49 conforme escopo do IEA Task 40/Annex 52 " <i>Towards Net Zero Energy Solar</i> 49 Buildings" (MUSALL et al., 2011) (adaptado). 49 Figura 10. Competição Solar Decathlon Europa, 2010, Madri. Fotografia: José 50 Figura 11. Solar Decathlon Europa edição 2012, Madri. 51 Figura 12. Esquerda: Casa solar Ekó concluída no parque da competição Solar 56 Figura 13. Planta baixa da edificação. 56 Figura 14. Detalhes construtivos da Casa Ekó. Fonte: <i>Project drawings</i> do 58 Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon 58 Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon 59	41,8º. Fonte: Quaschning (modificado)
conectados à rede no mundo. Fonte: EPIA (2012).35Figura 6. Esquema de instalações fotovoltaicas conectadas à rede elétrica(RIFFONNEAU et al., 2008) (adaptado).36Figura 7. Processo de conversão de energia no inversor.42Figura 8. Curva de eficiência do inversor SMA SMC 5000A em função da43potência elétrica de saída. Fonte: SunPower Corporation.43Figura 9. Medidas de eficiência energética aplicadas a edifícios à energia zeroconforme escopo do IEA Task 40/Annex 52 "Towards Net Zero Energy SolarBuildings" (MUSALL et al., 2011) (adaptado).49Figura 10. Competição Solar Decathlon Europa, 2010, Madri. Fotografia: JoséRipper Kós & Themis da Cruz Fagundes.50Figura 12. Esquerda: Casa solar Ekó concluída no parque da competição SolarDecathlon. Direita: Vista geral do interior da edificação.55Figura 13. Planta baixa da edificação.56Figura 14. Detalhes construtivos da Casa Ekó. Fonte: Project drawings do58Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon58Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon58Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon59	Figura 5. Potência instalada acumulada (GW) de sistemas fotovoltaicos
Figura 6. Esquema de instalações fotovoltaicas conectadas à rede elétrica (RIFFONNEAU et al., 2008) (adaptado)	conectados à rede no mundo. Fonte: EPIA (2012)
(RIFFONNEAU et al., 2008) (adaptado)	Figura 6. Esquema de instalações fotovoltaicas conectadas à rede elétrica
Figura 7. Processo de conversão de energia no inversor. 42 Figura 8. Curva de eficiência do inversor SMA SMC 5000A em função da potência elétrica de saída. Fonte: SunPower Corporation. 43 Figura 9. Medidas de eficiência energética aplicadas a edifícios à energia zero 43 conforme escopo do IEA Task 40/Annex 52 " <i>Towards Net Zero Energy Solar</i> 49 Figura 10. Competição Solar Decathlon Europa, 2010, Madri. Fotografia: José 50 Figura 11. Solar Decathlon Europa edição 2012, Madri. 51 Figura 12. Esquerda: Casa solar Ekó concluída no parque da competição Solar 55 Figura 13. Planta baixa da edificação. 56 Figura 14. Detalhes construtivos da Casa Ekó. Fonte: <i>Project drawings</i> do 58 Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon 58 Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon 59	(RIFFONNEAU et al., 2008) (adaptado)
Figura 8. Curva de eficiência do inversor SMA SMC 5000A em função da potência elétrica de saída. Fonte: SunPower Corporation. 43 Figura 9. Medidas de eficiência energética aplicadas a edifícios à energia zero conforme escopo do IEA Task 40/Annex 52 " <i>Towards Net Zero Energy Solar Buildings</i> " (MUSALL et al., 2011) (adaptado). 49 Figura 10. Competição Solar Decathlon Europa, 2010, Madri. Fotografia: José Ripper Kós & Themis da Cruz Fagundes. 50 Figura 11. Solar Decathlon Europa edição 2012, Madri. 51 Figura 12. Esquerda: Casa solar Ekó concluída no parque da competição Solar Decathlon. Direita: Vista geral do interior da edificação. 55 Figura 14. Detalhes construtivos da Casa Ekó. Fonte: <i>Project drawings</i> do projeto Ekó House. 58 Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon Europe 2012 em Madri, Espanha. 59	Figura 7. Processo de conversão de energia no inversor
potência elétrica de saída. Fonte: SunPower Corporation.43Figura 9. Medidas de eficiência energética aplicadas a edifícios à energia zero conforme escopo do IEA Task 40/Annex 52 " <i>Towards Net Zero Energy Solar</i> <i>Buildings</i> " (MUSALL et al., 2011) (adaptado).49Figura 10. Competição Solar Decathlon Europa, 2010, Madri. Fotografia: José Ripper Kós & Themis da Cruz Fagundes.50Figura 11. Solar Decathlon Europa edição 2012, Madri.51Figura 12. Esquerda: Casa solar Ekó concluída no parque da competição Solar 	Figura 8. Curva de eficiência do inversor SMA SMC 5000A em função da
Figura 9. Medidas de eficiência energética aplicadas a edifícios à energia zero conforme escopo do IEA Task 40/Annex 52 " <i>Towards Net Zero Energy Solar Buildings</i> " (MUSALL et al., 2011) (adaptado)	potência elétrica de saída. Fonte: SunPower Corporation
conforme escopo do IEA Task 40/Annex 52 " <i>Towards Net Zero Energy Solar</i> <i>Buildings</i> " (MUSALL et al., 2011) (adaptado)	Figura 9. Medidas de eficiência energética aplicadas a edifícios à energia zero
Buildings" (MUSALL et al., 2011) (adaptado).49Figura 10. Competição Solar Decathlon Europa, 2010, Madri. Fotografia: JoséRipper Kós & Themis da Cruz Fagundes.50Figura 11. Solar Decathlon Europa edição 2012, Madri.51Figura 12. Esquerda: Casa solar Ekó concluída no parque da competição SolarDecathlon. Direita: Vista geral do interior da edificação.55Figura 13. Planta baixa da edificação.56Figura 14. Detalhes construtivos da Casa Ekó. Fonte: Project drawings do58Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon58Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon59	conforme escopo do IEA Task 40/Annex 52 " <i>Towards Net Zero Energy Solar</i>
Figura 10. Competição Solar Decathlon Europa, 2010, Madri. Fotografia: José Ripper Kós & Themis da Cruz Fagundes. 50 Figura 11. Solar Decathlon Europa edição 2012, Madri. 51 Figura 12. Esquerda: Casa solar Ekó concluída no parque da competição Solar 50 Decathlon. Direita: Vista geral do interior da edificação. 55 Figura 13. Planta baixa da edificação. 56 Figura 14. Detalhes construtivos da Casa Ekó. Fonte: Project drawings do 58 Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon 58 Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon 59	Buildings" (MUSALL et al., 2011) (adaptado)
Ripper Kós & Themis da Cruz Fagundes.50Figura 11. Solar Decathlon Europa edição 2012, Madri.51Figura 12. Esquerda: Casa solar Ekó concluída no parque da competição SolarDecathlon. Direita: Vista geral do interior da edificação.55Figura 13. Planta baixa da edificação.56Figura 14. Detalhes construtivos da Casa Ekó. Fonte: Project drawings do58Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon58Europe 2012 em Madri, Espanha.59	Figura 10. Competição Solar Decathlon Europa, 2010, Madri. Fotografia: José
Figura 11. Solar Decathlon Europa edição 2012, Madri	Ripper Kós & Themis da Cruz Fagundes50
Figura 12. Esquerda: Casa solar Ekó concluída no parque da competição Solar Decathlon. Direita: Vista geral do interior da edificação. 55 Figura 13. Planta baixa da edificação. 56 Figura 14. Detalhes construtivos da Casa Ekó. Fonte: Project drawings do 58 Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon 59	Figura 11. Solar Decathlon Europa edição 2012, Madri
Decathlon. Direita: Vista geral do interior da edificação	Figura 12. Esquerda: Casa solar Ekó concluída no parque da competição Solar
Figura 13. Planta baixa da edificação.56Figura 14. Detalhes construtivos da Casa Ekó. Fonte: Project drawings doprojeto Ekó House.58Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar DecathlonEurope 2012 em Madri, Espanha.59	Decathlon. Direita: Vista geral do interior da edificação
Figura 14. Detalhes construtivos da Casa Ekó. Fonte: <i>Project drawings</i> do projeto Ekó House	Figura 13. Planta baixa da edificação 56
projeto Ekó House	Figura 14. Detalhes construtivos da Casa Ekó. Fonte: Project drawings do
Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon Europe 2012 em Madri, Espanha	projeto Ekó House
Europe 2012 em Madri, Espanha59	Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon
	Europe 2012 em Madri, Espanha59

Figura 16. Localização da casa de campo em Madri, local da competição de casas eco-eficientes Solar Decathlon Europe de 2012......60 Figura 18. Valores de tensão e corrente elétrica de operação dos subsistemas Figura 19. Módulo SunPower SPR 230 WHT. A_G: 1,27 m², A_{GT}: 61 m², Figura 20. Módulo SunPower SPR 230 WHT: Curva característica I x V. Figura 21. Medição de curva I x V de 8 módulos em série representando uma string do sistema. Curva vermelha: medida realizada nas condições climáticas de realização do ensaio (temperatura ambiente: 53,2°C, irradiância solar: 883 W/m²). Curva roxa: valores extrapolados, ajustados para as condições padrão de teste (CPT). Inclinação dos painéis: 10º. Local de medição: Figura 22. Integração dos módulos fotovoltaicos na edificação: Módulos fotovoltaicos fixados na estrutura metálica da cobertura ventilados Figura 23. Estrutura metálica da cobertura para integração do sistema solar da Figura 24. Vista geral de integração dos módulos fotovoltaicos na edificação Figura 25. Casa Ekó: Sistema de aterramento. Fonte: Project drawings do projeto Ekó House (modificado). 71 Figura 26. Kit de aterramento do inversor SMA Sunny Mini Central: Figura 27. Quadro elétrico EP1 de entrada de energia, proteção do sistema Figura 28. Configuração do sistema de aquisição de dados com barramento Figura 29. Planejamento do sistema de aquisição de dados na casa Ekó.

Figura 30. Sensores da estação solarimétrica: (a) Célula de referência para
medição de irradiação solar no plano inclinado. (b) Sensor Pt100 de
temperatura dos módulos fotovoltaicos (T _{mod})76
Figura 31. Mapa de irradiação solar global horizontal da Espanha.
Fonte: Solargis
Figura 32. Localização da estação climática Weather Analytics e do local da
competição Solar Decathlon em Madri, Espanha. Distância aproximada entre a
estação climática e a edificação: 2 km 80
Figura 33. Distribuição mensal da média da temperatura de bulbo seco e da
média da umidade relativa de Madri 81
Figura 34. Distribuição da média mensal da irradiância solar direta normal e
difusa horizontal de Madri 81
Figura 35. Modelo de simulação da edificação: (a) Fachada principal Sul, (b)
Fachada Norte, (c) Fachada Leste, (d) Fachada Oeste
Figura 36. Composição das camadas de construção da envoltória
Figura 37. Processo de construção da parede com isolamento de aerogel 84
Figura 38. Processo de construção do piso com isolamento de lã de vidro 84
Figura 39. Placa de OSB85
Figura 40. Placa de fibrocimento e estrutura de fixação para revestimento da
parede externa
Figura 41. Sistema solar térmico com tubos evacuados instalado na cobertura
da edificação. Inclinação: 15º; º: 180º90
Figura 42. Luminária linear de LEDs eW Cove Powercore dimerizada e
diagrama polar de direção e intensidade luminosa. P _{luminária} : 22,5 W
Figura 43. Princípio de funcionamento do sistema de condicionamento de ar
com bomba de calor (EGEC, 2008) (adaptado) 95
Figura 44. Parâmetros do modelo de gerador fotovoltaico Sandia no
EnergyPlus
Figura 45. Parâmetros do modelo de inversor Look Up Table no EnergyPlus. 99
Figura 46. Vista geral da Vila Solar. Localização: Madri, Espanha. Orientação
dos geradores fotovoltaicos: 9: 180º 103
Figura 47. Demanda de potência elétrica diária da casa Ekó, representando o
perfil de consumo de um casal. Intervalo de medição: 15 min 108
12

Figura 48. Perfil horário de consumo de energia elétrica da casa Ekó 108
Figura 49. Demanda de potência elétrica diária da casa Ekó no final de
semana. Intervalo de medição: 15 min 109
Figura 50. Perfil horário de consumo de energia elétrica da casa Ekó durante o
final de semana
Figura 51. Média diária da irradiação solar total H _{tot} incidente no plano dos
geradores fotovoltaicos 111
Figura 52. Irradiância solar no plano inclinado em Madri, Espanha. Célula de
referência: Sunny Sensor Box (a-Si). Inclinação: 15º. Orientação: 180º S.
Intervalo de medição: 15 min 112
Figura 53. Potência elétrica produzida em função da irradiância solar no plano
inclinado. Data de medição: 19 de setembro de 2012. Datalogger: Sunny Web
Box. Intervalo de medição: 15 min 113
Figura 54. Perfil horário de energia elétrica produzida em função da irradiação
solar no plano inclinado. Data de medição: 19 de setembro de 2012.
Datalogger: Sunny Web Box 113
Figura 55. Potência em c.c. P_{-cc} em função da irradiância solar G_{tot} utilizado
para determinar a potência nominal de operação do arranjo fotovoltaico. Data
de medição: 19 de setembro. Reta vermelha: Condições Padrão de Teste
(CPT); Reta azul: Condições de Operação 114
Figura 56. Capacidade de produção de potência elétrica em corrente contínua
(P _{-cc}) de 22 a 26 de setembro no Solar Decathlon
Figura 57. Produtividade final diária em função da irradiação solar entre 17 e 26
de setembro
Figura 58. Taxa de desempenho diária em função da irradiação solar entre 17 e
26 de setembro
Figura 59. Produtividade e Desempenho global do sistema solar fotovoltaico da
casa Ekó durante o Solar Decathlon118
Figura 60. Correlação de eficiência de Evans-Floschuetz para módulos de m-Si
em função da temperatura de operação do gerador FV. Data de medição: 19 de
setembro

Figura 61. Temperatura do módulo e temperatura ambiente sobre a eficiência
de conversão do gerador FV ($\eta G = \eta Tref[1 - \beta refTmod - Tref]$). Data de
medição: 19 de setembro 120
Figura 62. Distribuição diária do balanço de energia elétrica da edificação de 17
a 21 de setembro. Datalogger: Sunny Web Box. Intervalo de medição: 15 min.
Figura 63. Diferentes tipos de energia elétrica em função do tempo,
representado o balanço energético da edificação no dia 19 de setembro de
2012. Intervalo de medição de 15 min 124
Figura 64. Balanço de energia elétrica da edificação durante o Solar Decathlon.
Figura 65. Comparação da potência elétrica produzida em corrente alternada
entre cinco casas no dia 19 de setembro na competição Solar Decathlon 126
Figura 66. Comparação da produtividade final fotovoltaica (Y_F) característica de
Madri entre cinco casas da competição Solar Decathlon. Desvio azimutal do
Norte: 180º
Figura 67. Cenários de média de correlação temporal entre geração e consumo
de energia elétrica no dia 19 de setembro no Solar Decathlon. Curvas em azul:
Potência elétrica produzida em c.a., P _{-ca} . Curvas em vermelho: Potência
elétrica consumida, P _c 128
Figura 68. Perfil de consumo total diário de eletricidade de edificações do Solar
Decathlon. Data de medição: 19 de setembro. Intervalo de medição: 15 min.
Figura 69. Cálculo do consumo de eletricidade da casa Ekó em um dia típico do
Solar Decathlon
Figura 70. Distribuição diária de energia elétrica consumida pela TV, DVD e
computador, sistema de iluminação interna e máquina de lavar roupas 131
Figura 71. Cálculo da parcela do consumo de eletricidade das cargas elétricas
da edificação durante o Solar Decathlon133
Figura 72. Comparação entre dados medidos e simulados de $E_{c,d} e E_{imp,d}$ 134
Figura 73. Resultados das simulações de energia e potência elétrica produzida
pelo sistema solar fotovoltaico. Arquivo climático de simulação: TMY2 de Madri
do período do SDE 2012135
14

Figura 74. Resultados das simulações de perdas de energia elétrica nos Figura 75. Comparação entre os resultados medidos e simulados de E_{-ca.d}. Arquivo climático de simulação: TMY2 de Madri do período do SDE 2012. .. 137 Figura 76. Comparação entre os resultados medidos e simulados de E_{exp.d}. Arquivo climático de simulação: TMY2 de Madri do período do SDE 2012. .. 138 Figura 77. Comparações horárias entre as curvas medidas e simuladas de E_{-ca} de 17 a 19 de setembro. Arquivo climático de simulação: TMY2 de Madri do período do SDE 2012...... 140 Figura 78. Perfil de aproximação dos valores medidos e simulados com a reta linear. Data de análise: 19 de setembro......140 Figura 79. Comparações horárias entre as curvas medidas e simuladas de E_{exp} de 17 a 19 de setembro. Arquivo climático de simulação: TMY2 de Madri do período do SDE 2012...... 141 Figura 80. Perfil de aproximação dos valores medidos e simulados com a reta linear. Data de análise: 19 de setembro......141 Figura 81. Comparação do balanço de energia elétrica diário entre resultados Figura 82. Comparação entre os resultados medidos e simulados de Gtot.d. Arquivo climático de simulação: TMY2 de Madri do período do SDE 2012. .. 144 Figura 83. Comparações horárias entre as curvas medidas e simuladas de Gtot de 17 a 19 de setembro. Arquivo climático de simulação: TMY2 de Madri do período do SDE 2012...... 146 Figura 84. Perfil de aproximação dos valores medidos e simulados com a reta linear. Data de análise: 19 de setembro......146 Figura 85. Comparação da temperatura dos módulos fotovoltaicos T_{mod}. Arquivo climático: TMY2 de Madri. Sensor de medição: Pt 100. Data de análise: Figura 86. Simulações da distribuição de energia elétrica anual e radiação solar incidente no plano dos geradores fotovoltaicos. Arquivo climático: TMY2 do ano Figura 87. Simulações anuais de perdas térmicas nos inversores fotovoltaicos.

Figura 88. Balanço de energia elétrica conforme método de BOJIĆ et at.		
(2011)	153	
Figura 89. Investimento inicial do sistema solar fotovoltaico	156	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dimensões físicas da edificação.56
Tabela 2. Valores de operação dos subsistemas. 63
Tabela 3. Características elétricas do inversor SMA Sunny Mini Central 5000A.
Tabela 4. Propriedades físicas dos materiais e isolantes
Tabela 5. Propriedades físicas das janelas
Tabela 6. Características dos equipamentos eletroeletrônicos utilizados na
edificação
Tabela 7. Características do sistema de iluminação. 94
Tabela 8. Sistema de condicionamento de ar. 95
Tabela 9. Características dos sistemas de geração de eletricidade 102
Tabela 10. Cálculo do consumo de energia elétrica diário da edificação 132
Tabela 11. Comparação entre os resultados medidos e simulados de P _{-ca,d} . 135
Tabela 14. Comparação entre os resultados de $T_{mod,d}$ medido pelo sensor
Pt100 e os resultados simulados. Arquivo climático de simulação: TMY2 de
Madri do período do SDE 2012148
Tabela 15. Simulações anuais do balanço de energia elétrica da edificação em
Madri (kWh). Arquivo climático: TMY2 do ano de 2012 de Madri 150
Tabela 16. Custos do sistema solar fotovoltaico ¹
Tabela 17. Impostos e tributos dos módulos fotovoltaicos
Tabela 18. Impostos e tributos dos Inversores155
Tabela 19. Custo total do sistema com impostos e custo da energia
Tabela 20. Custo de produção de energia do sistema solar FV (R\$/kWh) 157
Tabela 21. Dados de financiamento SAC (São Paulo)158
Tabela 22. Retorno do investimento e taxa do retorno do investimento com
financiamento SAC158
Tabela 23. Custos do sistema solar fotovoltaico e custo da energia para o ano
atual

SIGLAS E ABREVIATURAS

γ _s	Altitude solar
φ	Ângulo azimutal
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A _G	Área útil do gerador fotovoltaico
A _{GT}	Área do arranjo fotovoltaico
a-Si	Célula solar de silício amorfo hidrogenado
c-Si	Célula solar de silício cristalino
p-Si	Célula solar de silício policristalino
m-Si	Célula solar de silício monocristalino
AM	Coeficiente de massa de ar
CPT	Condições padrão de teste: Irradiância solar à 1000 W/m², massa
	de ar de 1,5 g e temperatura das células fotovoltaicas de 25ºC
C.C.	Corrente Contínua
c.a.	Corrente Alternada
I _{sc}	Corrente elétrica de curto-circuito
I _{mpp}	Corrente elétrica máxima de operação do gerador FV
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
DR	Disjuntor Diferencial
DOE	United States Department of Energy
EEN	Edifício à Energia Negativa
EEZ	Edifício à Energia Zero
EEZCR	Edifício à Energia Zero Conectado à Rede elétrica
EEP	Edifício à Energia Positiva
EENP	Edifício à Energia Neto Positiva
EAS	Edifício Autossuficiente
ERE	Edifício Residencial Eco-Eficiente
η_G	Eficiência do gerador fotovoltaico
$\eta_{T_{ref}}$	Eficiência do gerador FV a uma temperatura de referência
η_I	Eficiência do inversor fotovoltaico
E _{-cc,i}	Energia elétrica produzida em c.c.

E _{-ca,i}	Energia elétrica produzida em c.a.
E _{c,i}	Energia elétrica total consumida pela edificação
E _{eletro,i}	Energia elétrica consumida pelos equipamentos eletroeletrônicos
E _{ilum,i}	Energia elétrica consumida pelo sistema de iluminação
E _{cond-ar,i}	Energia elétrica consumida pelo sistema de condic. de ar
E _{vent,i}	Energia elétrica consumida pelos ventiladores
E _{compre,i}	Energia elétrica consumida pelo compressor
E _{aque,i}	Energia elétrica consumida em modo aquecimento
E _{resfr,i}	Energia elétrica consumida em modo resfriamento
E _{imp,i}	Energia elétrica importada da rede elétrica
E _{-ca,c,i}	energia elétrica produzida pelo sistema solar fotovoltaico e
	diretamente consumida pela casa
E _{exp,i}	Energia elétrica produzida pelo sistema solar FV e exportada para
	a rede elétrica
E _{comp,i}	Energia elétrica injetada na rede elétrica que compensa a energia
	elétrica importada da rede
E _{exc,i}	Energia elétrica excedente produzida pelo sistema solar FV
E _{p,inv,<i>i</i>}	Energia elétrica perdida no processo de conversão c.cc.a. no
	inversor
E _{neto,i}	Energia elétrica neto
FC	Fator de Capacidade
FV	Fotovoltaico
HVAC	Heating, Ventilation and Air-Conditioning
ξ	Índice de correlação temporal
IEE	Instituto de Eletrotécnica e Energia
IEC	International Electrotechnical Commission
IEA	International Energy Agency
IWEC	International Weather for Energy Calculation
G	Irradiância solar
G _{dir}	Irradiância direta
G _{dirn}	Irradiância direta normal
G _{dif}	Irradiância difusa
G _{hor}	Irradiância global

G _{tot}	Irradiância total
Н	Irradiação solar
H _{dir}	Irradiação direta
H _{dirn}	Irradiação direta normal
H_{dif}	Irradiação difusa
H _{hor}	Irradiação global
H _{tot}	Irradiação total
LowE	Low Emissivity glass
OSB	Oriented Strand Board
P _c	Potência elétrica consumida
P _{-cc,i}	Potência elétrica em c.c. fornecida pelo gerador FV
P _{-ca,i}	Potência elétrica em c.a. fornecida pelo inversor FV
P _m	Potência máxima de saída do gerador fotovoltaico
P _{CPT}	Potência em corrente contínua (c.c.) nas condições padrão de
	teste
Pn	Potência Nominal de operação
Pı	Potência instalada
PR	Performance Ratio ou Taxa de Desempenho Global
Y _F	Produtividade final
Y _R	Produtividade de referência
R	Renda anual de operação do sistema solar fotovoltaico
RI	Retorno do investimento de um sistema solar fotovoltaico
SDE	Solar Decathlon
SWEC	Spanish Weather for Energy Calculations
SSB	Sunny Sensor Box (célula de referência)
SWB	Sunny Web Box (datalogger)
V _{oc}	Tensão elétrica de circuito aberto
V _{mpp}	Tensão máxima de operação do gerador FV
V _{ca}	Tensão em corrente alternada
V _{cc}	Tensão em corrente contínua
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMY	Typical Meteorological Year
$ au_{pv}$	Transmitância do encapsulamento frontal do módulo FV

Índices

i: intervalo de tempo de simulação das variáveis de saída no EnergyPlus *d*: variáveis de saída com distribuição de energia total diária *an*: variáveis de saída com distribuição de energia total anual *p*: pico

SUMÁRIO

1	. Introdução	. 25
	1.1 Justificativa e relevância do trabalho	. 26
2	. Revisão de Literatura	. 28
	2.1 Contexto energético mundial	. 28
	2.2 Recurso Solar	. 31
	2.3 Sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica (SFVCR)	. 33
	2.4 Eficiência do gerador fotovoltaico	. 39
	2.5 Temperatura do gerador fotovoltaico	. 40
	2.6 Eficiência e Perdas térmicas no inversor fotovoltaico	. 41
	2.7 Desempenho Global e Produtividade fotovoltaica	. 43
	2.8 Integração de módulos fotovoltaicos em edificações	. 44
	2.9 Edifícios residenciais eco-eficientes	. 45
	2.10 Competição Solar Decathlon Europa	. 49
	2.11 Simulações computacionais térmicas e energéticas em edificações	. 52
	2.12 Retorno do investimento aplicado a um sistema solar fotovoltaico	. 53
3	. Metodologia	. 55
	3.1 Procedimento experimental	. 55
	3.1.1 Características da edificação	. 55
	3.1.2 Sistema solar fotovoltaico	. 59
	3.1.3 Introdução	. 59
	3.1.4 Descrição do sistema	. 61
	3.1.5 Configuração do sistema solar fotovoltaico e inversores	. 61
	3.1.6 Características dos módulos fotovoltaicos e integração na cobertur	a
		. 65
	3.1.7 Sistema de aterramento, proteção eletrica e metodo de flação	. 70
	3.1.8 Sistema de aquisição de dados	. 73
	3.1.9 Estação solarimetrica	. 75
	3.1.10 Consumo de energia eletrica	./b
	3.2 Simulações termicas e energeticas no programa EnergyPlus	. 77

3.2.1 Arquivo climático de Madri e características climáticas	78
3.2.2 Modelo de simulação da edificação	81
3.2.3 Construção e materiais	82
3.3 Sistema solar térmico	89
3.4 Planejamento do funcionamento das cargas elétricas e ocupação	90
3.4.1 Equipamentos elétricos	91
3.4.2 Sistema de iluminação	93
3.4.3 Sistema de condicionamento de ar	94
3.5 Sistema solar fotovoltaico	96
3.5.1 Geradores fotovoltaicos	96
3.5.2 Inversores	98
3.6 Variáveis de saída no EnergyPlus	99
3.7 Operação do sistema de energia elétrica da edificação1	00
3.7.1 Energia elétrica diária consumida pela edificação1	00
3.7.2 Energia elétrica diária produzida pelo sistema solar fotovoltaico 1	00
3.8 Avaliação do desempenho de energia elétrica de edificações do Solar Decathlon1	01
3.9 Operação do sistema de energia – análise econômica1	03
3.9.1 Estimativa do custo do investimento1	03
3.9.2 Fator de capacidade e custo de produção1	04
4. Resultados 1	06
4.1 Resultados experimentais1	06
4.1.1 Consumo de energia elétrica total da edificação1	06
4.1.2 Radiação solar no plano inclinado e geração solar fotovoltaica 1	10
4.1.3 Produtividade final e taxa de desempenho global1	16
4.1.4 Influência da temperatura no gerador fotovoltaico1	18
4.1.5 Distribuição de energia elétrica diária1	21
4.2 Cenários de desempenho de energia elétrica de edificações do Solar	
Decathlon1	25
4.3 Comparações dos resultados simulados1	29
4.3.1 Distribuição de energia elétrica diária1	29
4.3.2 Variáveis climáticas diárias1	43
4.3.3 Radiação Solar 1	43
	23

Referências Bibliográficas	165
5. Conclusões finais e discussões	161
4.5 Retorno sobre investimento	153
4.4 Distribuição de energia elétrica anual	
4.3.4 Temperatura dos módulos fotovoltaicos	147

1. Introdução

Nos últimos anos, os modos como os novos edifícios estão sendo projetados vêm sofrendo mudanças, de tal maneira que se introduzem novos conceitos de eficiência energética e energias renováveis para geração de eletricidade. Espera-se, contudo, que as edificações atinjam níveis mais complexos de desempenho energético cumprindo os compromissos em reduzir as emissões de gases de efeito estufa e encontrando alternativas à utilização de combustíveis fósseis. Estes edifícios devem ser sustentáveis, com balanço de energia zero, econômicos para construção, manutenção e com vida útil satisfatória (KOLOKOTSA, 2010).

Os esforços para reduzir o consumo de energia destacam-se como um dos principais desafios para o desenvolvimento sustentável. O setor de edificações representa para o mundo a maior fonte de consumo de energia elétrica. Tipicamente, os edifícios são responsáveis por 40 % do consumo de energia primária na maioria dos países (ALRASHED, 2012). O setor residencial sozinho representa 30 % da eletricidade consumida nos países desenvolvidos, correspondendo a 21 % da energia relacionada às emissões de CO₂ (MILO, 2011). De acordo com o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), a energia utilizada em edificações poderá ser reduzida em 60 % até 2050 se ações imediatas para transformar o setor de construção civil forem tomadas (WBCSD, 2011).

A concepção de um edifício sustentável é atendida como uma solução realística para a mitigação das emissões de CO₂ e para a redução do uso de energia nas edificações (MARSZAL et al., 2011). Um projeto de um edifício à energia positiva exige diversos estudos, muitos deles relacionados aos fenômenos físicos como a iluminação, ventilação natural e ao comportamento hidrotérmico, aos sistemas de energia (cogeração e energias renováveis), sistemas de condicionamento de ar (HVAC ou HRV), instalações prediais (sistemas de iluminação e aquecimento de água), controle e gerenciamento (automação predial e análise do ciclo de vida). Contudo, a concepção de um edifício à energia positiva impõe dificuldades particulares na previsão das performances dinâmicas. As deduções construtivas associadas devem levar em conta tanto o conforto no inverno quanto no verão, considerando as contribuições internas e as contribuições solares passivas. Nestes aspectos, a modelização e as simulações das performances energéticas dinâmicas dos edifícios e os novos modos de gestão energética devem ser estudados. Até hoje os programas computacionais de simulação e de modelização são utilizados para trabalhar ao mesmo tempo sobre o envelope do edifício, mas também sobre as cargas elétricas. Os dois principais ambientes de simulação utilizados pela academia científica atual são o EnergyPlus e o TRNSYS. Porém por seus níveis de complexidade, eles são pouco utilizados pelos profissionais

da construção civil. Com o EnergyPlus são realizadas simulações para diferentes climas, a partir de um arquivo climático contendo dados horários definidos por medições integrais anuais provindos de estações meteorológicas. Como resultado, obtêm-se uma série de dados calculados, tais como temperaturas internas, temperaturas superficiais, fluxo de calor pelos componentes do edifício, ganhos internos de calor, consumo energético, trocas de ar, etc. (LAMBERTS et al., 2010). Nestes processos, a representação física da edificação possibilita análises graduais de desempenho térmico e energético conforme a sazonalidade e as características climáticas do local simulado. Desta maneira, estas medidas possibilitam a avaliação das melhores soluções construtivas beneficiando zonas de conforto e economia de energia elétrica.

1.1 Justificativa e relevância do trabalho

Constata-se que a demanda de energia elétrica aumenta cada vez mais à medida que acompanha o desenvolvimento da indústria, do comércio e das cidades em geral. Nas próximas duas décadas está prevista uma grande demanda da queima de combustíveis fósseis, como o petróleo e o gás natural. Com a diminuição das reservas de combustíveis fósseis ao longo do tempo, analistas da indústria do petróleo esperam um aumento substancial do preço do produto na medida em que a demanda ultrapassa a oferta. Por este motivo, é de suma importância o estudo e o incentivo ao uso de fontes renováveis de energia, que permitam uma alternativa no setor energético global.

As energias renováveis estão se tornando cada vez mais importantes para a sociedade moderna. A utilização de fontes renováveis para produção de energia elétrica começou em meados dos anos 70 com a implantação de usinas hidroelétricas com reaproveitamento d'água pluvial. A descoberta de outras fontes de energia, como a energia dos ventos e a energia solar trouxeram melhores perspectivas para o mercado energético mundial. A energia solar pode ser utilizada para geração de energia elétrica de forma direta através do efeito fotovoltaico. Os sistemas fotovoltaicos têm a grande vantagem de apresentar um mínimo impacto ambiental, pois não emitem poluentes em sua operação, não produzem ruídos e podem ser instalados em usinas geradoras próximas aos centros urbanos, ou ainda, em telhados residenciais.

A realização deste estudo possibilita a verificação do desempenho de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede de 11,04 kW_p, instalado no edifício residencial à energia neto positiva Ekó house, construído e projetado pela equipe brasileira na competição de casas eco-eficientes Solar Decathlon Europe de 2012. Os estudos dirigidos sobre os edifícios eficientes trabalham na melhoria da eficiência energética visando alcançar um baixo consumo anual de energia elétrica. Desta forma, além da verificação do desempenho da geração

de energia elétrica, este estudo será baseado na análise do consumo de energia das cargas elétricas relacionados ao sistema de iluminação, sistema de condicionamento de ar e equipamentos elétricos em geral. Comparando o balanço diário de geração e consumo de energia elétrica, é possível determinar o balanço global da edificação, analisando a energia excedente que pode ser injetada na rede elétrica. Os parâmetros do balanço energético da casa foram medidos durante o período da competição nas condições climáticas da cidade de Madri. De qualquer modo, este estudo poderá também futuramente ser aplicado em regiões distintas do Brasil, analisando assim o desempenho da edificação no país.

Através da obtenção e manipulação de dados experimentais de operação do sistema de geração de energia e das cargas elétricas, foram determinados indicadores que permitiram a comparação do desempenho com simulações computacionais no programa EnergyPlus. O EnergyPlus é um dos programas computacionais de simulações termo energética mais utilizado pela academia científica atual devido à sua capacidade de trabalhar sobre o envelope da edificação via uma aproximação de zonas térmicas e também sobre sistemas de condicionamento de ar, sistema de iluminação e sistema solar fotovoltaico, utilizando para isso modelos matemáticos complexos. O EnergyPlus é o programa oficial de simulação de edificações do departamento de energia dos Estados Unidos, promovido pelo programa de tecnologia em edificações do setor de energias renováveis e eficiência energética (FUMO et al., 2010). O programa EnergyPlus foi escolhido neste estudo em razão dos recursos e capacidades disponíveis em gerar dados de geração do sistema solar fotovoltaico e do consumo de energia elétrica das cargas elétricas da casa. As validações das simulações do EnergyPlus são baseadas em comparações com outros programas através dos métodos do BESTest (Building Energy Simulation Test) e nas atribuições de padrões de normas internacionais, como no caso da norma ANSI/ASHRAE 140 de 2011. Da mesma maneira, as validações têm como base testes analíticos baseados em projetos de pesquisa da ASHRAE 865 e 1052 e em diversos testes experimentais realizados em edificações.

As simulações de sistemas solares fotovoltaicos são ainda inexploradas no EnergyPlus, com poucas publicações sobre o tema. Por isso, uma das motivações deste trabalho vem da carência de trabalhos científicos encontrados na literatura, descrevendo uma metodologia envolvendo o balanço energético global de edificações. Assim, este trabalho pretende apresentar de forma detalhada simulações energéticas de uma edificação eco-eficiente a fim de encontrar resultados compatíveis com resultados de medições reais realizados na edificação operando progressivamente durante um período determinado.

2. Revisão de Literatura

2.1 Contexto energético mundial

Diversas mudanças importantes vêm ocorrendo no contexto energético mundial atualmente e que afetam significativamente os recursos naturais do planeta. Os problemas com o fornecimento e uso de energia estão relacionados a sérias questões de escassez de recursos naturais muito discutidas por órgãos ambientais ao redor do mundo. A geração de energia elétrica e o uso de combustíveis fósseis nas indústrias e nos meios de transportes podem contribuir significativamente com o aquecimento global, com a poluição do ar, desmatamentos, destruição da camada de ozônio e com contaminação do solo e da água por resíduos radioativos. Algumas estatísticas demonstraram que as emissões de CO₂ para a atmosfera aumentaram quase 80 % nas últimas três décadas (ELKINTON, 2009), decorrentes da industrialização e do aumento populacional, e aproximadamente 65 % de todas as emissões de gases de efeito estufa estão atribuídas ao fornecimento e uso de energia (IEA, 2012).

Existem altas expectativas de tecnologias capazes de facilitar a transição para uma matriz energética mais limpa e uma economia de energia mais eficiente, considerando a importância do crescimento das tecnologias renováveis no futuro da produção de energia elétrica. De acordo com a Agência Internacional de Energia, a demanda de eletricidade é projetada de 20.183 para 38.423 TWh de 2008 a 2035, representando um aumento de 90 %. Para atingir estas necessidades, o mundo precisará aumentar a capacidade de geração de energia em quase 50 %, o que significa quatro vezes a capacidade de geração dos Estados Unidos em 2008 (IEA, 2010).

Segundo estudos realizados pela Agência Internacional de Energia, a geração de eletricidade mundial em 2010 foi composta por 40,6 % de carvão mineral, 22,2 % de gás natural e 16 % de recursos hídricos. Os derivados do petróleo representaram apenas 4,6 %. Em relação ao consumo de recursos naturais, o petróleo é o combustível fóssil mais consumido no mundo (41,2 %). Logo em seguida a eletricidade representa 17,7 % do consumo energético do planeta e o gás natural 15,2 %. O balanço energético mundial de geração de eletricidade e consumo por fonte, ambos para o ano de 2010, estão apresentadas na Figura 1.



(b)

(a)

Figura 1. Balanço energético mundial: (a) Geração energia elétrica por fonte (TWh) (Outros (3,7%) inclui as fontes geotérmica, solar, eólica e os biocombustíveis). (b) Consumo por fonte (Mtoe) (Outros (3,4%) inclui as fontes geotérmica, solar, eólica, etc.). Fonte: IEA (2012).

Durante o período de 2006 a 2011, a capacidade total global de fontes de energias renováveis para a produção de energia elétrica cresceu significativamente, incluindo a solar fotovoltaica com e sem concentração solar, eólica, geotérmica, hidroelétrica e biomassa. Durante este período, os sistemas solares fotovoltaicos com e sem conexão à rede elétrica obtiveram o maior crescimento dentre todas as tecnologias, com 58 %, acompanhados pela energia solar térmica com concentração solar (37 %) e a energia eólica (26 %) (Figura 2). As fontes de energia hidroelétrica e geotérmica estão crescendo a taxas de 2 a 3 % ao ano, podendo ser comparados às taxas de crescimento global de combustíveis fósseis (de 1 a 4 %, sobretudo em países em desenvolvimento) (REPN, 2012).



Figura 2. Taxa média anual de crescimento de produção de energia com fontes de energia renováveis no mundo entre 2006 e 2011 (REPN, 2012).

Em 2011, as energias renováveis alcançaram uma potência instalada de 390 GW (não incluindo a energia hidroelétrica), com um aumento de 24 % em relação a 2010. Desde o ano 2000 ao ano de 2011, a tecnologia solar fotovoltaica teve o crescimento mais rápido no mundo dentre as energias renováveis. A energia solar fotovoltaica aumentou sua capacidade instalada de 30 GW em 2010 para 70 GW em 2011, representando um aumento de 74 % (REPN, 2012). Grande parte da nova capacidade foi impulsionada pelas reduções aceleradas nas tarifas, mudanças nas políticas de produção de energia e reduções substanciais nos custos da energia.

Conforme mostrado na Figura 3, os cinco países que apresentaram a maior capacidade de produção de eletricidade com fontes renováveis e não hidroelétricas são a China, Estados Unidos, Alemanha, Espanha e Itália. Incluindo as fontes hidroelétricas os maiores produtores são a China, Estados Unidos, Canadá, Brasil e Índia. As fontes de energias renováveis, incluindo a energia hidroelétrica, aumentaram em 31,1 % a capacidade de geração total de eletricidade na União Europeia em 2011 (REPN, 2012). Neste mesmo ano, a União Europeia instalou uma capacidade estimada de 17 GW de sistemas solares fotovoltaicos e conectou na rede elétrica próximo de 22 GW sendo que os sistemas em operação foram suficientes para atender a demanda de eletricidade de aproximadamente 15 milhões de residências (REPN, 2012). A Alemanha é o maior produtor de eletricidade com energia solar fotovoltaica (35,6 % da capacidade instalada no mundo em 2011) ultrapassando 30 GW em 2012 (FRAUNHOFER, 2013). A energia solar FV representou na Alemanha 3,1 % da geração de eletricidade total do país em 2011, 1,2 % superior ao ano anterior (REPN, 2012). Outros mercados europeus de energia solar FV no ano de 2011 incluem Itália (12,8 GW), Bélgica (1 GW), Inglaterra (0,9 GW) e Espanha (0,4 GW). Fora da Europa os maiores mercados encontram-se na China (2,1 GW), Estados Unidos (1,9 GW), Japão (1,3 GW) e Austrália (0,8 GW) (REPN, 2012).



Figura 3. Capacidade instalada total de energias renováveis (GW) em 2011 excluindo a energia hidroelétrica (REPN, 2012).

2.2 Recurso Solar

A energia proveniente do Sol é uma fonte inesgotável que pode ser capturada e transformada em formas úteis de energia, como calor e eletricidade, usando uma variedade de tecnologias. A viabilidade técnica e econômica de operação destas tecnologias depende do recurso solar disponível para uma determinada região. Por isso, é importante conhecer a radiação solar incidente na superfície da Terra tanto para compreender sua influência no clima terrestre como para estudar as formas de aplicações de conversão de energia e no seu aproveitamento em edificações.

As definições de radiação solar utilizadas em sistema solares fotovoltaicos no Brasil são estabelecidas a partir da publicação da norma ABNT NBR 10898 – Energia Solar Fotovoltaica – Terminologia. Esta norma determina a terminologia, simbologia e unidades padronizadas para as grandezas solarimétricas no Brasil (ABNT, 2006):

- Albedo: índice relativo à fração da energia solar recebida em uma unidade de área devido à refletância dos arredores e do solo onde está instalado o dispositivo fotovoltaico;
- Irradiância solar (G): taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, medida em Watt por metro quadrado (W/m²);
- Irradiância direta (G_{dir}): radiação solar indidente em uma superfície horizontal, sem ter sido espalhada pela atmosfera. A irradiância direta pode também ser normal (G_{dirn});
- Irradiância difusa (G_{dif}): potência radiante do céu, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, excluída a irradiância direta;

- Irradiância global (G_{hor}): potência radiante do céu, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal que é igual à irradiância direta mais a irradiância difusa;
- Irradiância total (G_{tot}): potência radiante do Sol total com as componentes direta, difusa e de albedo recebida em uma unidade de área em uma superfície com inclinação qualquer;
- Irradiação solar (H): irradiância solar integrada durante um dia, medida em Watt hora por metro quadro (Wh/m²);
- Irradiação direta (H_{dir}): irradiância solar direta horizontal integrada durante um dia. A irradiação direta pode também ser normal (H_{dirn});
- Irradiação difusa (H_{dif}): irradiância solar difusa integrada durante um dia;
- Irradiação global (H_{hor}): irradiância solar global integrada durante um dia;
- Irradiação total (H_{tot}): irradiância solar total integrada durante um dia.

A intensidade da radiação solar depende da distância entre o Sol e a Terra. No decorrer de um ano completo esta distância varia entre 1,47 x 10^8 km e 1,52 x 10^8 km. O fluxo de radiação solar que atinge o limite da atmosfera na superfície de 1 cm², denominado de constante solar G₀, varia entre 1.325 W/m² e 1.412 W/m². Normalmente adota-se um valor médio para G₀:

constante solar: $G_0 = 1.367 \text{ W/m}^2$

A radiação solar no espaço sem a influência da atmosfera terrestre refere-se a um espectro AM^1 0. Quando a luz solar atravessa a atmosfera da Terra, a intensidade de radiação solar é reduzida. A atmosfera da Terra reduz a irradiância solar a aproximadamente 1.000 W/m² para uma superfície perpendicular aos raios solares ao nível do mar ou em um dia de céu claro. A intensidade de radiação é reduzida através da reflexão, absorção (por ozônio, vapor de água, oxigênio e dióxido de carbono) e espalhamento (causada por moléculas de ar, partículas de poeira ou poluição). A Figura 4 mostra a redução da irradiância solar em um espectro AM 1,5 ($\gamma_S = 41,8^\circ$) em relação ao espectro no espaço AM 0. Em energia solar, AM 1,5 é usualmente utilizado para representar a média anual para médias latitudes. Consequentemente, a indústria de tecnologia solar utiliza AM 1,5 para padronizar testes em módulos solares terrestres.

Devido à atenuação dos raios solares, a radiação solar ao penetrar na atmosfera é composta de duas componentes: radiação direta e radiação difusa. O maior nível de radiação solar ocorre em dias ensolarados e parcialmente

¹ O coeficiente de massa de ar (AM) define o comprimento do percurso óptico através da atmosfera da Terra, expressa como uma proporção em relação à altitude solar (γ_s): AM = 1/sen(γ_s). γ_s perpendicular à superfície terrestre (AM 1) corresponde a altitude solar na linha do Equador ao meio-dia durante o equinócio de primavera ou de outono.

nublados. Em um dia de céu claro a irradiância pode atingir a superfície da Terra sob uma intensidade de 1.000 W/m² podendo chegar até 1.400 W/m² em curtos períodos de tempo. Algumas regiões próximas à linha do Equador atingem valores de irradiação solar de 2.300 kWh/m² por ano ao mesmo tempo em que algumas regiões do Sul da Europa este valor é de 1.700 kWh/m² (DGS, 2008).



Figura 4. Espectro solar no espaço e na superfície terrestre AM 1,5 e γ_s de 41,8°. Fonte: Quaschning (modificado).

2.3 Sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica (SFVCR)

Os sistemas fotovoltaicos são atualmente divididos em duas grandes categorias: os sistemas autônomos e os sistemas conectados à rede elétrica. Os sistemas autônomos são concebidos para responder às necessidades de consumo de um edifício isolado à rede elétrica. Estes sistemas são constituídos de elementos de estoque, principalmente por baterias recarregáveis, a fim de adaptar a produção fotovoltaica com a demanda. Em aplicações de sistemas fotovoltaicos com corrente nominal na faixa prevista pelos módulos FV atuais, a resistência interna da bateria aumenta reduzindo a capacidade da célula em fornecer corrente elétrica. Desta maneira, a capacidade da célula diminui ao longo do tempo.

A conexão de um sistema fotovoltaico na rede elétrica possui a vantagem de não necessitar de elementos de estoque de energia, o que diminui os custos e ainda eleva a confiabilidade do sistema, já que nos momentos de carência de radiação solar a edificação pode utilizar a energia da rede elétrica. A geração de eletricidade próxima ao ponto de consumo traz benefícios tanto para as companhias de energia elétrica quanto para os consumidores, ambos interessados em geração distribuída, mas em perspectivas diferentes. Para as companhias a principal vantagem é que elas podem gerar energia e vender para os consumidores utilizando a infraestrutura de rede já existente. No ponto de vista dos usuários da rede, a vantagem é que eles podem utilizar a rede elétrica como uma alternativa de segurança (ZAHEDI, 2011).

A energia elétrica transmitida em grandes distâncias de uma usina geradora até as unidades consumidoras apresenta perdas na transmissão e na distribuição (T&D) da energia. Assim é fácil perceber, que a geração de energia descentralizada e de preferência gerada no local de consumo permite que as perdas em T&D sejam reduzidas, evitando gastos com componentes elétricos e linhas de transmissão. Além disso, a conversão direta da radiação solar em eletricidade com geradores fotovoltaicos conectados à rede elétrica traz diversos benefícios tanto para o meio-ambiente quanto para o sistema elétrico (RÜTHER & ZILLES, 2011). A vantagem para o meio-ambiente é a produção de energia renovável e totalmente limpa e o benefício para o sistema elétrico é a alternativa de uso da energia solar para complementar a produção de outras fontes de energia. A geração hidroelétrica, por exemplo, pode diminuir consideravelmente seus recursos com a estiagem e, diferentemente do recurso solar, não está disponível em todos os lugares. Analisando o ciclo de vida de um sistema solar FV, sua contribuição para as emissões de CO₂ ocorre no processo de fabricação e transporte dos componentes do sistema. Após este processo, a geração de eletricidade com um sistema FV não emite nenhum tipo de poluente. Uma das vantagens para a utilização de sistemas FV em centros urbanos está na forma de operação do sistema, pelo qual exige um espaço mínimo para instalação dos geradores, havendo a possibilidade de integrar módulos FV em fachadas e cobertura de edificações. Um sistema solar fotovoltaico conectado à rede apresenta essencialmente os seguintes componentes:

- 1. Módulos solares fotovoltaicos conectados em série e/ou paralelo;
- 2. Condutores elétricos em corrente contínua c.c.;
- 3. Caixa de conexão c.c.;
- 4. Quadro de distribuição com dispositivos de proteção elétrica;
- 5. Inversores fotovoltaicos;
- 6. Condutores elétricos em corrente alternada c.a.;
- 7. Medidores de energia elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede podem ainda injetar a energia produzida pelo sistema para a rede elétrica. Nos sistemas que efetuam a medição neto da energia (*net metering*), a energia produzida pelo sistema solar fotovoltaico é registrada em um medidor e então contabilizada em créditos de energia. Os sistemas *net metering* são genericamente incentivos

governamentais para promover a utilização em escala de energias renováveis. No entanto, as regras variam significativamente em cada país, levando em consideração a validade dos créditos disponíveis e o valor dos créditos, conforme o nível de geração de energia e a área da edificação. Algumas leis requerem o pagamento mensal de pequenas taxas de kWh, o pagamento de déficits da energia importada da rede elétrica ou a liquidação anual de qualquer crédito residual.

A Figura 5 mostra a potência instalada acumulada de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no mundo. Analisando a figura, é fácil perceber um crescimento bastante acentuado na potência instalada no ano de 2011. Neste panorama, Itália e Alemanha corresponderam juntos a quase 60 % do crescimento do mercado global (EPIA, 2012). Dependendo das condições do cenário moderado, 100 GW poderão ser alcançados em 2012 ou 2013, enquanto que no cenário de perspectivas políticas mais de 350 GW de sistemas FV poderão ser conectados à rede elétrica no mundo nos próximos cinco anos. Após o crescimento do mercado fotovoltaico espanhol em 2008, a Alemanha foi o único mercado importante em 2009, e consequentemente o crescimento europeu como um todo foi limitado. Porém, conforme a Associação da Indústria Fotovoltaica Europeia, a Europa aumentou sua capacidade instalada acumulada em 50 % em 2011.



Figura 5. Potência instalada acumulada (GW) de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no mundo. Fonte: EPIA (2012).

Conforme a Figura 6, duas configurações muito utilizadas em instalações de sistemas solares fotovoltaicos podem ser empregadas:

(a) Injeção do total da produção: a energia produzida pelos módulos é diretamente injetada na rede elétrica. Os períodos de injeção na rede correspondem aos períodos da produção fotovoltaica.

(b) Injeção da produção de energia excedente: a energia produzida pelos módulos solares é diretamente consumida pela edificação. A energia excedente da produção, não aproveitada diretamente pela carga, é injetada na rede elétrica.



(a) Injeção do total de produção.



(b) Injeção da produção de energia excedente.

Figura 6. Esquema de instalações fotovoltaicas conectadas à rede elétrica (RIFFONNEAU et al., 2008) (adaptado).

Uma célula fotovoltaica é um dispositivo elétrico de estado sólido capaz de converter a radiação solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Um conjunto de células solares interligadas em um encapsulamento protegido ambientalmente denomina-se módulo fotovoltaico. A maior parte dos módulos fotovoltaicos utilizam células solares de silício com encapsulamento frontal de polímero termoplástico transparente, eletricamente isolado e com alta resistência mecânica e à degradação pela radiação solar. Este encapsulante é
normalmente fabricado em EVA (Acetato de Vinil Etila), no qual é aplicado diretamente sobre a superfície das células fotovoltaicas e coberto por vidro temperado (texturizado ou não) podendo diminuir a reflexão solar.

Os sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede podem utilizar diversas tecnologias de células fotovoltaicas. As tecnologias disponíveis atualmente são principalmente voltadas para a eficiência de conversão e o baixo custo. Os custos dos módulos FV têm caído no passado a uma taxa de 15 % a 22 %, e considera-se uma redução no custo total do sistema para cada duplicação da capacidade instalada acumulada (IEA, 2012). Estimulada pela sobreoferta de módulos fotovoltaicos causados, sobretudo, pela crise econômica que vem afetando o mercado europeu, a redução de preços de módulos de silício cristalino no atacado alcançou, entre janeiro e novembro de 2011, 42 % na China e 31 % na Alemanha (EPE, 2012).

As células solares de silício micro, mono ou policristalino (c-Si) ocupam praticamente 95 % do mercado fotovoltaico. Os rendimentos de conversão são da ordem de 12 a 18 %, conforme a natureza cristalina do material utilizado e do processo de fabricação. As células de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) apresentam a metade do rendimento das anteriores, representando 5 % do mercado. Dentre outros tipos de células fotovoltaicas, destacam-se as células de heterojunção com filme fino intrínseco (HIT - *Heterojunction with intrinsic thin layer*), baseadas em silício cristalino com uma camada de silício amorfo. Outras tecnologias de células fotovoltaicas disponíveis no mercado são as de células de Telureto de Cádmio (CdTe), células de disseleneto de cobre-índio-gálio (CulnGaSe2), ou CIGS, células de disseleneto de cobre-índio (CulnSe2), ou CIS e células orgânicas, porém sua utilização comercial ainda é limitada.

A geração fotovoltaica consiste de componentes múltiplos como células, conexões elétricas e mecânicas e de meios de regulação ou modificação da energia elétrica de saída (PARIDA et al., 2011). A partir de diferentes potenciais instalados em cada área disponível para integração de módulos fotovoltaicos, que se modifica a partir da tecnologia e custo do módulo, podem-se criar diferentes cenários de geração fotovoltaica. A produção de energia elétrica é realizada em corrente contínua pelos geradores fotovoltaicos e em seguida a energia é convertida em corrente alternada pelo inversor. A potência elétrica em c.c. fornecida pelo gerador FV é obtida aplicando-se a eficiência de seguimento de máxima potência do gerador (η_{spmp}):

$$P_{-cc} = P_m \cdot \eta_{spmp} \quad (1)$$

Pelo qual P_m é a potência máxima de saída do gerador fotovoltaico.

Por sua vez, a potência elétrica em c.a. na saída do inversor pode ser calculada a partir de P_{-cc} e depende da eficiência do inversor fotovoltaico η_I :

$$P_{-ca} = P_{-cc}.\eta_{I} \quad (2)$$

No nível de geração de eletricidade, a energia elétrica produzida em c.a. pelo sistema (E_{-ca}, kWh) é diretamente dependente da irradiação solar no plano inclinado dos geradores fotovoltaicos (H_{tot}, kWh/m²) e pode ser calculada conforme a equação a seguir:

$$E_{-ca} = \frac{P_{I} \cdot H_{tot} \cdot PR}{G_{CPT}}$$
(3)

Onde P_I é potência instalada do sistema FV e PR é a taxa de desempenho do SFVCR (*performance ratio*) (tipicamente 80 %).

A potência P_I pode ser calculada conforme a expressão:

$$P_I = n. P_n \quad (4)$$

Pelo qual, *n* é o número de módulos fotovoltaicos do sistema e P_n é a potência nominal do módulo FV.

Conforme indicado na literatura, nem toda energia gerada é aproveitada pelo sistema. As perdas de energia são decorrentes de diversas razões, que podem atuar ou não de forma combinada, tais como:

- Perdas na conversão de energia de c.c. em c.a. nos inversores;
- Sombreamentos nos módulos fotovoltaicos;
- Perdas (ôhmicas) nos condutores elétricos, tanto no lado c.c. como c.a. da instalação;
- Redução de eficiência dos módulos fotovoltaicos decorrente de temperaturas mais elevadas que as utilizadas nos ensaios realizados pelo fabricante (ABINEE, 2012);
- Acúmulo de poeira ou sujeira nos módulos, reduzindo a capacidade de absorção da irradiação solar;
- Eventuais desligamentos do sistema para manutenções ou trocas de componentes elétricos ou mesmo por falhas no sistema.

Em relação à tecnologia propriamente dita, o descasamento entre módulos de uma mesma *string* (que leva a perdas no rendimento conhecida como *module*

mismatch losses) e as resistências dos condutores exercem influências na geração de energia (RÜTHER, 2004). Em todo caso, estes fatores associados podem reduzir a produção anual de energia elétrica. Contudo, algumas medidas de manutenção corretiva e preditiva podem melhorar o desempenho do sistema (*performance ratio*).

2.4 Eficiência do gerador fotovoltaico

A eficiência de conversão de uma célula fotovoltaica corresponde ao percentual de energia solar incidente na área útil de um dispositivo fotovoltaico que é convertida em energia elétrica. Melhorar a eficiência de conversão é um objetivo chave de pesquisa e ajuda a tornar a tecnologia fotovoltaica mais competitiva em relação às fontes tradicionais de energia. Para determinar a eficiência de uma célula, utiliza-se a relação de tensão e corrente (curva I x V) expondo a célula a um nível de luminosidade e temperatura constante (condições padrão de teste - CPT). As curvas são obtidas variando a resistência de carga medindo a corrente elétrica produzida. Variando a resistência de zero, em condição de curto-circuito, para infinito, em condição de circuito-aberto, é possível determinar o ponto de máxima potência produzida (P_m). A máxima potência ocorre no ponto da curva no qual o produto entre tensão e corrente é máximo representando a máxima eficiência de conversão do dispositivo solar. Em condições normais de operação, a eficiência do gerador fotovoltaico é uma função da corrente máxima de operação (Impp) e da tensão de operação (V_{mpp}) e pode ser calculada conforme a Equação 5.

$$\eta_G = \frac{(I_{mpp}, V_{mpp})}{(H_{tot}, A_G)}.100$$
(5)

Onde, A_G corresponde à área útil do gerador fotovoltaico (m²) e H_{tot} corresponde à irradiação total (Wh/m²).

A eficiência de uma célula solar não é constante e grande parte da energia solar que atinge a célula é perdida antes de ser convertida em eletricidade. Algumas características do dispositivo fotovoltaico limitam a produção de energia, como a sensibilidade espectral da célula solar e a reflexão do módulo fotovoltaico. A sensibilidade espectral está relacionada com a energia necessária para excitar um elétron e conduzi-lo da banda de valência para a banda de condução, a chamada energia de banda proibida. Cada tipo de material semicondutor que compõe a célula possui uma energia de banda adequada,

são capazes de excitar os elétrons. Desta forma, a célula não responde inteiramente ao espectro da radiação solar, pois sempre opera em uma faixa restrita conforme sua sensibilidade espectral. A sensibilidade espectral de cada tecnologia de célula solar pode desperdiçar até 55 % da energia solar original (DOE, 2013).

A eficiência pode ser aumentada minimizando a quantidade de luz refletida para fora da superfície da célula. A reflexão da luz solar pode diminuir mais de 30 % a quantidade de luz incidente para módulos de silício não tratado (DOE, 2013). Alguns outros fatores também afetam a eficiência de conversão, tais como a resistência natural das células, pelo qual predomina a resistência natural ao fluxo de elétrons, causando diminuição da eficiência. Estas perdas ocorrem predominantemente na interface entre a célula e os contatos elétricos que conduzem a corrente a um circuito externo. A transmitância do encapsulamento do módulo FV e a intensidade de radiação solar são os últimos fatores considerados que podem afetar a eficiência do gerador FV.

2.5 Temperatura do gerador fotovoltaico

A temperatura do gerador fotovoltaico é um fator que exerce influência significativa no processo de produção de energia elétrica em sistemas solares. Além de causar deterioração das células solares, a temperatura modifica a eficiência dos módulos fotovoltaicos. Conforme Zondag (2008), na determinação da eficiência da célula no ponto de máxima potência, a tensão V_{oc} decresce com a temperatura, ao mesmo tempo em que a corrente I_{sc} aumenta. Assim, o efeito da temperatura na eficiência da célula está relacionado com Equação 6, pelo qual está intimamente ligada à temperatura de operação da célula/módulo (T_{mod}).

$$\eta_G = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref} (T_{mod} - T_{ref}) + \gamma log_{10} G_T] \quad (6)$$

O coeficiente de temperatura β_{ref} e o coeficiente de radiação solar γ , representam propriedades dos materiais e possuem valores de 0,004 °C⁻¹ e 0,12, respectivamente, para módulos de silício cristalino (NOTTON et al., 2005). O segundo coeficiente é usualmente adotado zero (EVANS, 1981), por isso a equação é reduzida à Equação 7, no qual representa a expressão linear tradicional que determina a eficiência de conversão fotovoltaica em função da temperatura (EVANS & FLORSCHUETZ, 1977).

$$\eta_G = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref} (T_{mod} - T_{ref})] \quad (7)$$

A temperatura de operação também exerce influência significativa na potência elétrica de saída do gerador FV. Com a elevação da temperatura das células FV, ocorre uma redução significativa tensão do gerador e um pequeno aumento na corrente elétrica fotogerada, resultando na diminuição da potência fornecida (ALMEIDA, 2012). Como regra geral, a potência fornecida pelo gerador FV cai entre 0,3 e 0,4 % a cada aumento de 1°C (AYOMPE et al., 2010). O desempenho do módulo em termos de potência elétrica de saída pode ser considerado como o desvio das condições padrão de teste, especificada pelo fabricante. A influência de T_{mod} na potência elétrica de saída do gerador pode ser calculada a partir da equação:

$$P_{-cc} = G_{tot} \tau_{pv} \eta_{T_{ref}} A[1 - 0.0045(T_{mod} - 25)]$$
(8)

Em que τ_{pv} é a transmitância do encapsulamento frontal do módulo FV.

A perda de calor no módulo para o ambiente externo que pode modificar a temperatura do módulo FV pode ser realizada de três maneiras: por condução, convecção ou radiação. Estes mecanismos de perdas dependem da resistência térmica dos materiais do módulo FV, das propriedades emissivas do módulo e das condições ambientais (particularmente da velocidade do vento) em que o módulo é exposto. A transferência de calor por convecção depende da situação física pelo qual o módulo FV é submetido. A convecção pode ser uma combinação de convecção natural e convecção forçada. Em dias calmos, a convecção natural pode ser a principal forma de resfriamento dos módulos. Já quando o vento atinge a superfície dos módulos a convecção forçada deve predominar (JONES, 2001).

2.6 Eficiência e Perdas térmicas no inversor fotovoltaico

O processo de conversão de corrente contínua em corrente alternada (c.c.- c.a.) no inversor segue o princípio de conservação de energia conforme Figura 7. Neste processo, a energia elétrica recebida pelo inversor ($W_{recebida}$) é convertida em duas formas de energia na saída: (1) energia elétrica útil produzida pelo sistema solar FV ($W_{\text{útil}}$) correspondendo à energia elétrica em corrente alternada na saída do inversor (E_{-ca}) e (2) energia térmica decorrente das perdas nos inversores ($W_{perdida}$) correspondendo à energia elétrica perdida na forma de calor por efeito Joule no processo de conversão c.c.- c.a. ($E_{p,inv}$).



Figura 7. Processo de conversão de energia no inversor.

A eficiência de conversão de energia c.c.- c.a. de um inversor (η_I) corresponde à razão entre a energia em corrente alternada na saída do inversor (E_{-ca}) e a energia em corrente contínua na entrada do inversor (E_{-cc}). A eficiência pode ser expressa em termos de potência elétrica, sendo calculada pela relação entre P_{-ca e} P_{-cc} conforme Equação 9. A Equação mostra que a eficiência é também uma relação entre a potência útil do sistema (P_{útil}), ou potência elétrica em c.a. útil produzida pelo sistema (P_{-ca}), e a potência recebida em c.c. pelo sistema solar FV (P_{recebida}), pelo qual, P_{recebida} é a soma da P_{útil} com a potência perdida por efeito Joule (P_{perdida}).

$$\eta_{I} = \frac{P_{-ca}}{P_{-cc}} = \frac{P_{\acute{u}til}}{P_{recebida}} = \frac{P_{\acute{u}til}}{P_{\acute{u}til} + P_{perdida}} \quad (9)$$

A eficiência instantânea de conversão do inversor pode ser definida como a razão entre a potência em c.a. na saída do inversor em um dado momento e sua potência nominal de operação. No entanto, a eficiência do inversor depende principalmente da tensão de entrada em c.c. no inversor, determinada pela conexão série-paralelo do arranjo fotovoltaico. A Figura 8, mostra a curva de eficiência do inversor SMA SMC 5000A em função da potência de saída sob diferentes níveis de tensão c.c. Por outro lado, a eficiência global do inversor depende em grau elevado do número de elementos de comutação no circuito elétrico do equipamento (BOURDOUCEN et al., 2000). Isto pode ser realizado com a aplicação de um diodo com capacidade de comutação controlada, como um tiristor ou um dispositivo semelhante. Desta forma, a melhoria da eficiência está relacionada à inovação da topologia do circuito e não propriamente aos materiais empregados na sua fabricação.



Figura 8. Curva de eficiência do inversor SMA SMC 5000A em função da potência elétrica de saída. Fonte: SunPower Corporation.

2.7 Desempenho Global e Produtividade fotovoltaica

O desempenho global, ou *Performance Ratio* (PR), é uma medida internacional utilizada em sistemas fotovoltaicos para determinar o grau de utilização de um sistema. Normalizado com relação à radiação solar, PR identifica a ocorrência de perdas de energia no sistema devido a problemas nas conexões elétricas, sombreamento e/ou sujeira nos módulos, ineficiência dos inversores, *mismatch* ou ao efeito da temperatura dos módulos. Os valores de PR são normalmente atribuídos através da aquisição de dados anuais do sistema. Todavia, valores calculados para intervalos menores, como valores diários ou horários, podem identificar ocorrências de falhas no sistema (MARION, 2005).

A temperatura do módulo exerce grande influência na taxa de desempenho global: em climas quentes PR é normalmente menor quando comparado com climas frios (REICH et al., 2012). Valores elevados de temperatura aumentam as perdas no gerador FV e diminuem o PR em cerca de 0,4%/°C (MAU & JAHN, 2009), enquanto que a dispersão do desempenho global é menor com valores mais elevados de irradiância conforme foi demonstrado por Almeida (2012). A taxa de desempenho global é definida pela norma IEC 61724 como a razão entre a taxa de produtividade final (Y_F) e a taxa de produtividade de referência (Y_R) nas condições padrão de teste e depende diretamente da eficiência de pré-conversão (η_{pre}), da eficiência relativa do gerador FV (η_{rel}) e da eficiência do sistema FV (η_{sist}).

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \cdot 100 = \eta_{pre} \eta_{rel} \eta_{sist} \quad (10)$$

A produtividade de referência é a quantidade de irradiação total no plano do gerador FV por unidade de irradiância de referência e é dada pela Equação 11. Nas condições padrão de teste, Y_R é determinado em função da irradiância solar de referência ($G_{CPT} = 1.000 \text{ W/m}^2$). Este parâmetro define o recurso solar do sistema solar FV. Por sua vez, a produtividade final ($Y_F - kWh/kW$) de um sistema está relacionada com o número de horas equivalentes que o gerador FV deveria operar com sua potência nominal para produzir a mesma quantidade de energia igual a E_{-ca} e é dado pela Equação 12. A produtividade final depende da potência nominal do gerador nas condições padrão de teste (P_{CPT}) e normaliza a energia produzida com relação ao tamanho do sistema; consequentemente este parâmetro pode ser utilizado para comparar sistemas de tamanhos diferentes (MARION, 2005).

$$Y_R = \frac{H_{tot}}{G_{CPT}} \quad (11)$$
$$Y_F = \frac{E_{-ca}}{P_{CPT}} \quad (12)$$

2.8 Integração de módulos fotovoltaicos em edificações

A indústria de módulos fotovoltaicos tem crescido substancialmente nos últimos anos e várias empresas tem criado linhas de produtos para integrar os módulos nas edificações. As técnicas usuais combinam a geração de energia elétrica com elementos construtivos da edificação tais como telhados, vidros ou persianas. Os sistemas solares fotovoltaicos integrados em edificações (*Building-Integrated Photovoltaics –* BIPV) têm avançado para o ponto de maior facilidade de integração na arquitetura dos edifícios. O tamanho, custo e aparência dos módulos são adaptados para substituir materiais tradicionais presentes na estrutura da cobertura.

Yoo et al. propuseram um método de sombreamento utilizando módulos fotovoltaicos afim de reduzir a carga térmica de resfriamento ao mesmo tempo permitindo que a luz natural penetrasse no interior da edificação durante as estações mais frias do ano e conduziram análises do desempenho do sistema, avaliação da eficiência do sistema e da potência de saída (YOO et al., 2002). Ordenes et al. analisaram o potencial de sete tecnologias BIPV implementas em um protótipo residencial simuladas em três diferentes cidades brasileiras no programa EnergyPlus com o objetivo de integrar a geração de energia com a demanda da edificação (ORDENES et al., 2007). Rüther et al. estudaram o comportamento de um SFVCR e a conversão de energia solar de um BIPV em um ambiente urbano de uma área metropolitana de uma capital brasileira

visando maximizar os benefícios da geração de energia distribuída (RÜTHER et al., 2008). Cheng et al. desenvolveram uma aproximação empírica para avaliação da irradiação solar anual em telhados inclinados com inclinações de 0 a 90° e ângulos azimutais de 0 a 90° na envoltória de edificações para aplicações de BIPV em Taiwan (CHENG et al., 2005).

Uma instalação solar fotovoltaica integrada a uma edificação e conectada à rede elétrica é composta por vários componentes, incluindo painéis solares, sistema de fixação ao envoltório da construção, sistema de conversão c.c.- c.a. (inversor) e dispositivos elétricos de proteção e acionamento (RÜTHER, 2004). A otimização das aplicações envolvendo sistemas solares fotovoltaicos integrados em edificações é função de muitas variáveis, dentre elas, os métodos de construção e materiais, tecnologia fotovoltaica e fabricação dos módulos, níveis de irradiação solar e orientação. Estas variáveis são projetadas e escolhidas de acordo com as condições climáticas locais, da parcela de energia gerada e do período do ano onde se pretende gerar mais energia. O aumento da intensidade da luz incidente no módulo FV aumenta a temperatura das células, diminuindo a tensão do módulo, e consequentemente reduzindo sua eficiência. Desta forma, a escolha dos módulos instalados na cobertura é determinada pelo seu comportamento térmico. Em todo caso, existe a possibilidade de degradação dos painéis devido à temperatura. Alguns revestimentos de EVA, por exemplo, podem ser danificados em temperaturas acima de 90°C (MEI et al., 2009).

2.9 Edifícios residenciais eco-eficientes

Os edifícios residenciais eco-eficientes (ERE) são caracterizados pelo baixo consumo energético através da aplicação de recursos passivos de energia para ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento. O recurso solar é muito utilizado nestas edificações para produção de energia elétrica com sistemas fovoltaicos ou para aquecimento de água com sistemas solares térmicos. Em geral, nestas edificações, a demanda de energia para aquecimento e resfriamento é reduzida, e esta demanda pode ser atendida em uma base anual, a partir de uma fonte renovável de energia (KOLOKOTSA, 2011). Em um edíficio eco-eficiente as análises climáticas e de construção podem

Em um edifició eco-eficiente as análises climáticas e de construção podem constribuir no desempenho energético final. De toda forma, é conveniente trabalhar nas reduções das necessidades energéticas a afim de obter um edifício de baixo consumo energético e com baixas taxas de emissões de CO₂. Como o montante de energia elétrica produzida por um sistema solar FV em uma edificação residencial é limitado, devido as dimensões do telhado, a regra geral é reduzir a demanda de eletricidade. Isto minimiza o requerimento de geração de energia e a área requerida para geração de energia (BOJIĆ et al.,

2011). As tecnologias de geração de energia podem ser empregadas para gerar energia térmica, com os coletores solares térmicos, ou energia elétrica, com sistemas eólicos ou sistemas solares fotovoltaicos ou ainda produzir energia térmica e energia elétrica ao mesmo tempo, com os sistemas solares fotovoltaicos híbridos, no qual combinam células fotovoltaicas e coletores solares térmicos no mesmo dispositivo. Os sistemas solares fotovoltaicos são mais amplamente empregados nos ERE, em consequência da facilidade de integração e grande capacidade de operação em edificações. Segundo Musall et. al. (2011), nenhum dos principais exemplos de edifícios à energia zero existem sem a geração de energia solar fotovoltaica.

O balanço de energia elétrica é quantificado em uma base anual e por definição estes edifícios podem ser classificados como: edifícios à energia negativa (EEN) ou edifícios à energia neto negativa (EENN) - produzem menos energia do que consomem; edifícios à energia zero (EEZ) ou edifícios à energia neto zero (EENZ) - produzem toda a energia que consomem e edifícios à energia positiva (EEP) ou edifícios à energia neto positiva (EENP) - produzem mais energia do que consomem. O termo balanço negativo, ou também utilizado o termo balanço neto negativo, significa que anualmente a energia elétrica excedente injetada na rede elétrica é menor que a energia elétrica importada da rede. O termo balanço zero, ou balanço neto zero, significa que anualmente a energia elétrica excedente injetada na rede elétrica é pelo menos igual à energia elétrica importada da rede. Já o termo balanço positivo, ou balanço neto positivo, significa que anualmente a energia elétrica excedente injetada na rede elétrica é maior que a energia elétrica importada da rede (BOJIC et al., 2011). Os ERE podem ser ainda classificados em edifícios autossuficientes (EAS) ou atônomos. Os EAS produzem toda a energia elétrica que consomem e normalmente utilizam um banco de baterias para a armazenar a eletricidade produzida utilizando-a nos períodos em que a produção de energia renovável é insuficiente para abastecer a carga da edificação. Em geral, os EAS não utilizam a rede elétrica como backup, porém eles podem ser conectados à rede elétrica para segurança, no caso de uma falha no sistema de fornecimento de energia ou quando a produção de energia é insuficiente, mesmo com o estoque de energia, devido às condições climáticas locais.

Padrões voluntários para edificações de baixo consumo utilizando princípios de isolamento reforçado, vedação de juntas e pontos de infiltração e sistemas de ventilação com recuperação de calor estão se tornando populares na América do Norte e na Europa, como o *R-2000 homes* no Canadá e o *Passivhaus* na Alemanha (*Passive House Institute* - www.passiv.de) (HERNANDEZ et al., 2010). Estes edifícios podem atingir uma redução significativa na demanda energética e esse é um dos principais desafios apontados para um ERE. Dependendo das condições climáticas impostas, a redução da demanda poderia ser considerada uma etapa inicial para redução de custos envolvidos

com eletricidade em uma edificação de baixo consumo. Charron (2006) examinou o desempenho de edifícios residenciais à energia zero do plano desenvolvido pelo US-DOE denominado "2000 US Zero Net Energy Buildings Outreach and Action Plan" publicado em janeiro de 2000 (DOE, 2004). Este plano resultou em centenas de casas de baixa energia, algumas delas qualificadas como edifícios à energia zero conectados à rede (EEZCR). Até o final de 2020, este plano visa a construção de 100.000 casas solares à energia zero nos Estados Unidos. Segundo Leckner & Zmeureanu (2011), esta iniciativa foi umas das motivações do governo americano para promover a competição de ERE Solar Decathlon.

Dentro do contexto atual, os ERE não são bem definidos, no que diz respeito às formas de avaliar o desempenho energético e as concepções das fases de programa, design, construção e operação. Os conceitos de edifícios ecoeficientes empregados na literatura variam para cada projeto e as metodologias de cálculo são na maioria dos casos diferentes, desenvolvida para um caso particular, conforme as condições climáticas, capital disponível para investimento e o comportamento dos usuários. Devido a isto, uma metodologia de cálculo confiável é necessária fornecendo informações em como o balanço neto é computado. Dentro deste contexto, Torcellini et. al. (2006) realizaram uma análise baseada nas definições de edifícios à energia zero existentes na literatura com respeito aos mais importantes aspectos discutidos para o desenvolvimento de um novo EEZ. Segundo os autores, um edifício residencial ou comercial à energia zero reduz as necessidades energéticas através de ganhos de eficiência, tal que o balanço de energia necessário pode ser suprido com tecnologias renováveis. Conforme Laustsen (2008), os edifícios à energia zero conectados à rede (EEZCR), são edifícios que ao longo de um ano são neutros, significando que exportam tanta energia para a rede quanto importam dela. Nestes termos, não existe a necessidade de consumo de nenhum combustível fóssil para aquecimento, resfriamento ou iluminação, mesmo às vezes extraindo energia da rede elétrica. Laustsen também considera que os EEZ e EEP podem possuir a conexão de uma ou mais infraestrutura de rede, podendo ser uma rede de distribuição de energia elétrica, rede de gás natural, rede de distribuição de combustíveis ou uma rede de biomassa.

Em virtude da falta de padronização de definições e metodologias de cálculo comentadas anteriormente, no aspecto mais geral, Marszal et al. (2011) determinaram que os ERE necessitam de definições mais claras e consistentes e uma metodologia mais precisa e confiável antes de serem inteiramente implementadas nos códigos nacionais de edificações e normas internacionais. O parlamento Europeu recentemente aprovou uma reformulação do desempenho energético dos edifícios em que definem os EEZCR como um "edifício onde, como resultado de seu alto nível de eficiência energética, o consumo de energia primária anual é igual ou menor do que a energia

produzida pelas fontes de energias renováveis locais" (EUROPEAN PARLIAMENT, 2009).

Os ERE são também caracterizados pela utilização de tecnologias de ponta nos processos de aquecimento, resfriamento, conforto ambiental e geração de energia térmica e elétrica, tendo sempre como recurso principal a economia de energia e a parcial ou guase nula utilização de combustíveis fósseis. Algumas medidas construtivas para a redução da demanda de energia e do conforto do usuário são as soluções em sistemas de dutos de ar para aquecimento, resfriamento e ventilação (HVAC - Heating, Ventilation and Air-Conditiong), sistemas termosolares para aquecimento de água e o uso dispositivos de sombreamento passivos. A Figura 9 apresenta alguns exemplos de tecnologias empregadas em edifícios à energia zero através dos resultados de uma pesquisa realizada por um grupo de pesquisadores do IEA Task 40/Annex 52 "Towards Net Zero Energy Solar Buildings" (http://task40.iea-shc.org) através do estudo de 280 edifícios sustentáveis construídos ao redor mundo. Das três tipologias de edifícios analisados, 100 % dos edifícios residenciais apresentam isolamento térmico nas paredes, aproximadamente 40 % apresentam iluminação com lâmpadas LED, mais da metade utilizam dispositivos de sombreamento (shading device), como persianas ou brises nas janelas, e acima de 60 % dos edifícios possuem um sistema HVAC.

A falta de inovações nos sistemas de fornecimento de energia e a impossibilidade de compartilhamento entre as tecnologias de energia e de design (bioclimatologia, geometria e materiais de construção avançados) e principalmente a falta de investimentos, são as principais limitações dos edifícios eficientes.



Figura 9. Medidas de eficiência energética aplicadas a edifícios à energia zero conforme escopo do IEA Task 40/Annex 52 "*Towards Net Zero Energy Solar Buildings*" (MUSALL et al., 2011) (adaptado).

2.10 Competição Solar Decathlon Europa

O Solar Decathlon é uma competição de nível acadêmico promovida pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (U.S. DOE). Surgiu com o objetivo de incentivar trabalhos de pesquisa que viabilizem o uso da energia solar em residências adaptadas ao aproveitamento da luz solar para geração de eletricidade e redução do consumo de energia através de elementos passivos de última geração. A competição prioriza os conceitos do aproveitamento dos recursos naturais para ventilação e iluminação, geração de energia solar fotovoltaica, baixo consumo energético e a viabilidade técnicoeconômica da construção. Esta competição ocorre tradicionalmente no National Mall, em Washington, desde 2002. Após a segunda edição, o evento passou a ocorrer a cada dois anos. Na competição de 2002, o foco principal foi destinado para o mercado de tecnologias solares residenciais e conforme a tipologia dos sistemas fotovoltaicos foram dirigidos maiores esforços para os sistemas solares fotovoltaicos não conectados à rede (off-grid). Com o objetivo de aumentar as aplicações de sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede (on-grid), o departamento de energia dos Estados Unidos apoiou na

competição Solar Decathlon de 2005 casas adaptadas com melhores performances para sistemas conectados à rede. Na edição de 2007, as regras da competição exigiram das equipes simulações de níveis de geração projetados acima de 30 anos, utilizando o *Building America Benchmark procedures* (HENDRON, 2012), (CHOUDHARY et al., 2008).

Em 2010, a *Universidad Politécnica de Madrid*, em conjunto com o *Ministério de Viviendas* da Espanha, organizaram a primeira versão do evento fora dos Estados Unidos, que ocorreu em um parque criado às margens do Rio Manzanares e vizinho ao Palácio Real em Madri (KÓS & FAGUNDES, 2011) (Figura 10).



Figura 10. Competição Solar Decathlon Europa, 2010, Madri. Fotografia: José Ripper Kós & Themis da Cruz Fagundes.

Conforme as regras impostas pela organização, cerca de 20 equipes, de universidades do mundo inteiro, projetam, constroem e transportam suas casas solares para o campo da competição. Uma comissão avalia a operação das através de 10 provas que incluem casas durante duas semanas, conhecimentos específicos nos domínios de arquitetura, engenharia, viabilidade de mercado, comunicação, zona de conforto, equipamentos, aquecimento de água, sistema de iluminação e balanço de energia elétrica (WANG et al., 2009). A comissão organizadora do evento monitora a operação das casas obtendo informações de temperatura e de iluminância interna de conforto, de qualidade do ar, de umidade relativa e de autonomia de energia elétrica. Para isto, a organização instala sensores e medidores de energia elétrica no interior das casas, coletando estas informações para a avaliação do desempenho térmico e energético diário das edificações. As casas, construídas com aproximadamente 75 m² de área útil possibilitam que diferentes grupos de pesquisa possam interagir em busca da máxima eficiência térmica e energética e um menor nível de emissões de CO₂ para a atmosfera, contribuindo para o progresso de uma sociedade sustentável. Segundo Yeang (2007), a competição representa, para as universidades participantes uma oportunidade inovadora em vários aspectos.

As principais características dos protótipos das casas construídas no Solar Decathlon são as inovações tecnológicas presentes nos diversos sistemas integrados das casas, sejam sistemas de automação e controle, sistemas mecânicos de condicionamento de ar ou sistemas hidráulicos de aquecimento de água. A competição foi lançada para desenvolver edifícios solares de última geração ou, em outras palavras, edifícios capazes de produzir energia elétrica através de fontes de energias renováveis consumindo o mínimo de energia com a adoção de medidas de eficiência energética. Os sistemas solares fotovoltaicos foram os sistemas de geração de energia adotados nas casas do Solar Decathlon, primeiro pelo propósito de serem sistemas flexíveis e de fácil adaptação nas fachadas e cobertura, e segundo por não ocuparem área extra, tendo a vantagem de gerar eletricidade no próprio local de consumo. Sendo que as regras de algumas edições da competição sofreram alterações, a conexão dos sistemas fotovoltaicos com a rede elétrica tornou-se prioridade nas últimas edições. Figura 11 mostra uma imagem das equipes da competição Solar Decathlon Europa de 2012 no qual ocorreu a primeira participação do Brasil com a casa Ekó.



Figura 11. Solar Decathlon Europa edição 2012, Madri.

2.11 Simulações computacionais térmicas e energéticas em

edificações

As simulações térmicas e energéticas em edificações fornecem informações decisivas desde as primeiras fases de projeto, permitindo avaliar alternativas através de programação, design, construção e operação-retrofit. Dentre as vantagens e aplicações das simulações está a identificação de melhorias na eficiência energética, estimativa de redução de consumo e demanda de energia. Permite também avaliações de projeto com objetivos de desempenho já estabelecidos, atribuindo rapidez, baixo custo e melhor precisão dos resultados se comparado a outros métodos disponíveis.

O Building Energy Tools Directory, um site mantido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, lista mais de 392 programas de simulação para avaliação da eficiência energética e a implantação de energias renováveis em edifícios. O EnergyPlus é um programa desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. O programa foi desenvolvido a partir dos programas BLAST e DOE-2. O BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) e o DOE-2 foram desenvolvidos no final da década de 70 e no início da década de 80 como ferramentas de simulações energéticas. Sua intenção era propor uma interface para otimizar a performance de energia e na análise de custos. O programa EnergyPlus possui capacidade de simulação diferenciada em relação aos demais programas, tais como "time-step" de cálculo menor que uma hora, sistema modular, possibilidade de cálculo de infiltração de ar para uma ou mais zona térmica, cálculo de índices de conforto térmico (MELO, 2009), cálculos de integração de sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica, cálculos de demanda de energia elétrica, cálculo de custos e análise do ciclo de vida. Além disso, o programa EnegyPlus integra vários módulos que trabalham juntos para calcular a energia requerida para aquecer ou resfriar um edifício usando uma variedade de sistemas e fontes de energia com possibilidade de simulação em diferentes condições ambientais e operacionais (MELO, 2009).

O desempenho térmico de uma edificação está relacionado às condições climáticas de uma determinada região tais como temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, velocidade do vento, umidade relativa, pressão atmosférica, densidade do ar, dentre outras características. Dados climáticos horários são registrados em estações climáticas automáticas frequentemente instaladas em aeroportos pelo qual geralmente localizam-se fora da zona urbana. Assim, a localização destas estações geram imprecisões nos dados climáticos por não registrar os efeitos da cidade no microclima e, portanto, no desempenho térmico de uma edificação (CARLO, 2005).

Os programas computacionais que simulam o desempenho térmico de edificações necessitam de dados climáticos para representação das condições externas do tempo em modelos matemáticos. Quanto mais detalhado for o programa, mais detalhamento deverá ter um arquivo climático, chegando ser necessário o registro horário de dados climáticos para atender programas computacionais como o DOE-2.1E e o EnergyPlus (CARLO, 2005). Os arquivos climáticos geralmente elegem um ano específico para servir como o ano de referência. Arquivos IWEC, por exemplo, são coletados e distribuídos conforme as definições ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Calculations). Existem também arquivos no formato TRY (Test Reference Year). Este tipo de arquivo faz um mapeamento ao longo dos meses do ano de medida, e forma uma base de dados do ano que mais se assemelha às condições climáticas da região. O TRY é, portanto, uma série de dados climáticos tratados segundo uma metodologia, e representa uma situação referencial do clima local, enquanto o arquivo com extensão try é um formato para uso específico em um programa computacional. Outro formato de arquivo climático foi obtido pelo National Climatic Data Center, (NCDC), do departamento de energia dos Estados Unidos. Através de dados climáticos horários obtidos de estações de aeroportos brasileiros, o DOE reuniu dados de acordo com a metodologia de criação de um TMY2, Test Meteorological Year, versão 2. Os formatos dos arquivos climáticos compilados no EnergyPlus (EnergyPlus Weather - EPW) são baseados nos arquivos de formato TMY2. Para utilização dos arquivos climáticos no EnergyPlus com formatos diferentes do EPW, o programa disponibiliza um sistema de conversão para o formato EPW através da plataforma Weather Statistics and Conversions.

Também existe a possibilidade de utilizar um arquivo climático com os dados horários do mês e dia de projeto. Nesta situação é possível analisar com maior precisão o desempenho térmico da edificação em um determinado período do ano. As simulações para os dias típicos de projeto são realizadas utilizando-se a classe de objeto *Design Day* do EnergyPlus. Para desenvolver o dimensionamento do sistema, o programa utiliza o perfil de carga térmica estimado para cada dia de projeto.

2.12 Retorno do investimento aplicado a um sistema solar

fotovoltaico

Entre as tecnologias de conversão de energia solar em energia elétrica, a geração fotovoltaica é a que se encontra em estado de desenvolvimento mais avançado, sobretudo no avanço da produção de módulos fotovoltaicos. Os sistemas solares fotovoltaicos apresentam condições econômicas que poderão permitir a atração de investidores, sejam eles corporativos ou mesmo

individuais (EPE, 2012). Um dos requisitos mais importantes para o investimento de um sistema fotovoltaico é a estimativa do tempo do retorno do investimento, levando em consideração a lucratividade na produção de energia e a vida útil que o sistema poderá atingir em longo prazo.

O cálculo do tempo de retorno do investimento, do inglês *payback time*, pode ser considerado como o tempo decorrido entre o investimento inicial e o momento no qual o lucro líquido acumulado se iguala ao valor desse investimento. A estimativa do retorno do investimento (R_I) de um sistema solar fotovoltaico em operação pode ser calculado como:

$$R_I = C_{total} / R$$
 (13)

Pelo qual R é a renda anual de operação do sistema solar fotovoltaico.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é uma taxa de desconto hipotética que, quando aplicada a um fluxo de caixa, faz com que os valores das despesas sejam iguais aos valores dos retornos dos investimentos trazidos ao valor presente (BRANCO, 2002). A TIR é a taxa que o investidor obtém em média em cada ano sobre os capitais que se mantêm investidos no projeto, enquanto o investimento inicial é recuperado progressivamente.

3. Metodologia

3.1 Procedimento experimental

3.1.1 Características da edificação

Como o objetivo principal deste trabalho é a pesquisa do comportamento energético de um edifício à energia positiva, tornou-se necessário uma edificação modelo para realizar tal estudo. Assim, tomou-se como estudo de caso o edifício residencial denominado Ekó House (Figura 12), construído para participar da competição Solar Decathlon Europe de 2012, na cidade de Madri, Espanha. O nome Ekó é de origem Tupi-Guarani, o que significa "viver" ou "modo de viver", se inspira no conceito da diversidade e da pluralidade da cultura brasileira e valoriza a importância do Sol e as relações do homem com a natureza (Manual de projeto Ekó House, 2012). O projeto da casa solar Ekó foi criado com o objetivo de promover pesquisa científica em edificações de baixo consumo energético, relacionado sobretudo a eficiência energética e a geração das energias elétrica e térmica. A proposta desta casa modelo foi de incentivar a construção de edificações que utilizam formas de energias renováveis para diminuir a dependência de combustíveis fósseis presentes na natureza e de encontrar meios de inovar os sistemas tecnológicos a fim de torná-los mais econômicos e funcionais.



Figura 12. Esquerda: Casa solar Ekó concluída no parque da competição Solar Decathlon. Direita: Vista geral do interior da edificação.

A casa possui um quarto, uma sala de jantar, uma sala de estar, uma cozinha e um banheiro. A área externa possui uma área de serviço, varandas e um gabinete técnico destinado às instalações elétricas e hidráulicas. A planta baixa da edificação está mostrada na Figura 13 e as dimensões físicas da edificação estão mostradas na Tabela 1.



Figura 13. Planta baixa da edificação.

Tabela 1. Dimensões físicas da edificação.

Área total (m ²)	55,62
Volume (m ³)	183
Área de superfície (m ²)	208
Volume condicionado (m ³)	183
Área da cobertura (m ²)	55,62
Área de vidros (m ²)	21,91
Área por pessoa (m²)	23,8
Transmitância térmica da fachada (W/m ² .k)	0,15
Transmitância térmica da cobertura (W/m ² .k)	0,10

A casa Ekó explora a mistura do ambiente natural com tecnologias de última geração utilizando a combinação destes elementos para melhorar o desempenho térmico e energético. Esta combinação proporciona condições de conforto não somente pelo uso de sistemas passivos de energia como também pela construção de varandas em plena harmonia com a natureza. Os elementos tradicionais, tais como o bambu e a madeira OSB são associados com estruturas metálicas, da mesma maneira que módulos solares

fotovoltaicos de geração de energia elétrica são integrados na cobertura, conforme pode ser observado pela Figura 14. Além disso, brises horizontais externas automatizadas são integradas na fachada principal para proporcionar maior conforto térmico no verão e economia de energia elétrica com iluminação interna e com condicionamento de ar. As principais características da casa Ekó são o alto desempenho energético, o qual incorpora princípios de bioclimatologia em seu projeto auxiliado por simulações computacionais térmicas e energéticas. A casa incorpora um avançado sistema de automação residencial que informa os usuários sobre o impacto de suas decisões no consumo de energia elétrica, tão quanto o impacto da casa sobre os recursos naturais. Os principais recursos de eficiência energética utilizados na casa são os seguintes:

- Isolamento térmico das paredes internas, piso e teto com lã de vidro;
- Isolamento térmico das paredes externas com aerogel;
- Barreira de vapor nas paredes internas, piso e teto;
- Vidros com controle solar;
- Sombreamento interno com persianas automatizadas;
- Iluminação interna e externa com lâmpadas LED;
- Ajuste da intensidade da iluminação interna com sensores fotoelétricos integrados ao sistema de automação e controle;
- Orientação solar, inclusive das janelas, onde sua área e orientação determinam o controle de ganho de calor para o interior da edificação;
- Controle da taxa de infiltração (ganho térmico por frestas e aberturas);
- Aquecimento de água com sistema solar de tubos evacuados;
- Sistema de condicionamento de ar eficiente (HVAC/PTHP Packaged Terminal Heat Pump);
- Eletrodomésticos com baixo consumo energético.



Figura 14. Detalhes construtivos da Casa Ekó. Fonte: *Project drawings* do projeto Ekó House.

O Solar Decathlon de 2012 apresenta 20 equipes participantes de várias partes do mundo e a casa Ekó representou o continente sul-americano na competição. Esta casa é parte do processo de pesquisa e promoção de edificações sustentáveis promovido pela Eletrobrás em parceria com universidades brasileiras. A equipe brasileira é liderada pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e pela Universidade de São Paulo (USP), com participação de outras universidades, como: a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e a Universidade de Campinas (Unicamp). A casa Ekó foi construída em São Paulo no Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo. Grande parte dos materiais de construção foram financiados por recursos do governo brasileiro ou patrocinados por empresas, assim como pelos próprios recursos das universidades. Para a construção da casa, foi utilizada mão-de-obra de estudantes de graduação e pós-graduação que participaram das atividades práticas no canteiro de obras. Algumas etapas, como a instalação das esquadrias das janelas e a instalação do piso de madeira interno, foram realizadas por empresas especializadas. O sistema hidráulico e de condicionamento de ar foi instalado por uma empresa espanhola no parque da competição em Madri.

A casa Ekó foi projetada para ser construída com rapidez, devido à necessidade de transportá-la desde a Universidade de São Paulo até o campo da competição em Madri. A proposta do projeto também visa baixo custo, mão de obra reduzida no processo de construção e facilidade na operação e manutenção. A estrutura da casa é constituída de três módulos independentes. Através da Figura 15 é possível observar a montagem de uma das paredes do primeiro módulo assim como o processo de montagem do teto do segundo módulo. Grande parte da edificação foi construída no Brasil, como os pisos,

tetos e paredes de cada módulo com seus respectivos isolantes. A casa foi montada no parque da competição em Madri em aproximadamente duas semanas. Detalhes da construção e materiais da casa serão descritos na Seção 3.2.3 da página 82.



Figura 15. Construção da casa Ekó no parque da competição Solar Decathlon Europe 2012 em Madri, Espanha.

3.1.2 Sistema solar fotovoltaico

3.1.3 Introdução

Este trabalho apresenta o desempenho energético de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica (SFVCR) instalado em Madri, Espanha. O sistema de 11,04 kW_p operou de 17 de setembro de 2012 até o dia 27 de setembro na casa de campo em Madri, cenário do parque da competição Solar Decathlon (Figura 16). Madri é uma cidade com clima mediterrâneo continental, com alto índice de irradiação solar, apresentando uma média diária de 4,63 kWh/m² no mês de setembro, e uma média de 4,97 kWh/m²/dia durante a competição.



Figura 16. Localização da casa de campo em Madri, local da competição de casas eco-eficientes Solar Decathlon Europe de 2012.

Desde o início, os esforços do projeto da casa Ekó dirigiram-se para um edifício eficiente que comportasse um sistema altamente eficaz capaz de suprir a demanda de eletricidade da casa. Praticamente toda a área do telhado foi aproveitada para comportar geradores fotovoltaicos, o qual otimiza a capacidade instalada do sistema. Foram estudadas as possibilidades de instalação de módulos fotovoltaicos nas fachadas da casa, porém optou-se pela integração dos módulos na cobertura já que o telhado possui a maior irradiação do envelope da edificação. Quantificando o investimento dos painéis fotovoltaicos, verificou-se que a instalação de módulos nas fachadas elevaria os custos do sistema sem a necessidade de gerar esta energia excedente em virtude da limitação de potência dos inversores em 10 kW, conforme estabelecem as regras da competição.

Foram analisadas diferentes tecnologias fotovoltaicas, observando as propriedades elétricas, eficiência da conversão de energia, potencial de geração de eletricidade e a integração arguitetônica. Inicialmente, foi discutida a utilização de módulos de filme fino (a-Si). Além de serem de fácil adaptação em edificações, os módulos de filme fino apresentam desempenho melhorado nos climas mais quentes, já que esta tecnologia não apresenta redução na potência com o aumento da temperatura de operação (RÜTHER, 2004). Assim, o bom comportamento no calor seria uma vantagem durante a competição no verão quente de Madri. Outra vantagem é que o tempo de retorno do investimento (energy payback time) para o a-Si é consideravelmente menor que o do c-Si, conforme indica Rüther (2004). Todavia, com a proposta de criação de um edifício com energia positiva, selecionado para produzir anualmente mais que a energia necessária para sua utilização, optou-se pela melhor eficiência de conversão, aderindo aos módulos de silício monocristalino (c-Si). As células solares de silício monocristalino oferecem um aumento da eficiência quando comparados com células de silício amorfo apesar de utilizarem uma maior quantidade de material (PARIDA et al., 2011). Por produzirem mais energia com tamanhos de módulos reduzidos, com a utilização desta tecnologia foi necessário menos espaço na cobertura, o que facilitou a instalação e a manutenção e permitiu uma geração anual máxima de eletricidade.

3.1.4 Descrição do sistema

3.1.5 Configuração do sistema solar fotovoltaico e inversores

O sistema solar fotovoltaico da casa Ekó foi projetado para ser um sistema conectado à rede elétrica e suficiente para fornecer energia ao sistema elétrico da casa. Com energia renovável, o sistema pode produzir eletricidade com os módulos fotovoltaicos presentes na estrutura da cobertura. Devido à conexão na rede elétrica, o sistema pode consumir energia tanto do sistema solar quanto da rede elétrica. O diagrama unifilar geral do sistema solar fotovoltaico está representado pela Figura 17. A configuração do sistema é baseada em um sistema net metering pelo qual a casa recebe créditos pela energia que é injetada na rede elétrica. Nesta configuração de sistema, toda energia elétrica produzida é destinada para suprir a demanda da casa. Em todo caso, se a energia produzida é superior ao consumo da casa, a energia elétrica excedente é exportada para a rede elétrica. Por outro lado, se a produção do sistema solar é insuficiente para abastecer a demanda, a edificação importa energia da rede elétrica. Tipicamente, um sistema net metering utiliza um medidor bidirecional: em uma direção é efetuada a medição convencional de consumo de energia elétrica da edificação, ou seja, a medição da energia que está sendo comprada da rede; a outra direção é utilizada quando a produção de energia elétrica é superior à demanda de eletricidade da edificação. Neste caso, o medidor contabiliza os créditos de energia elétrica excedente produzida pelo sistema. Conforme indica a Figura, o sistema da casa Ekó é constituído de dois medidores de energia: o primeiro é destinado a medir a energia elétrica produzida pelo sistema solar FV (E_{-ca}); o segundo destina-se a medição do consumo de eletricidade total da casa (E_c). A energia elétrica importada da rede elétrica (E_{imp}) corresponde à diferença entre E_c e E_{-ca} , e só ocorre quando $E_{-ca} < E_c$. A energia elétrica exportada para a rede elétrica (E_{exp}) corresponde à diferença entre E_{-ac} e E_c quando $E_{-ac} > E_c$. Detalhes da distribuição de energia elétrica da edificação, assim como a introdução e cálculos de outros tipos de energia elétrica presentes na interação entre o sistema solar fotovoltaico, a carga elétrica e a rede elétrica serão apresentados na Seção 3.7 na página 99. A inclinação dos painéis fotovoltaicos é de 15º com desvio azimutal do norte de 180°. Através do diagrama, é possível analisar as características dos dispositivos de proteção no lado c.c. e c.a. Detalhes do sistema de proteção elétrica e do sistema de aterramento serão descritos na Seção 3.1.7 da página 70.



Figura 17. Sistema solar fotovoltaico: Diagrama unifilar geral.

De acordo com a área disponível na cobertura, foram alocados 48 módulos na edificação, resultando em uma potência instalada de 11,04 kW_p. O sistema solar fotovoltaico da casa Ekó foi dividido em dois subsistemas iguais de 24 módulos, sendo cada subsistema composto de 3 *strings* em paralelo de 8 módulos em série. Os valores de operação dos subsistemas estão mostrados na Tabela 2. Observa-se pela tabela que a potência máxima de cada string é de 1.840 W, resultando em uma potência máxima de 5.520 W em cada subsistema. Nas condições padrão de teste (CPT), a tensão e corrente de operação máxima de cada string são de 389,6 V e 5,61 A respectivamente (Figura 16). Considerando um fator de segurança de 1,25, em casos em que o nível de irradiância ultrapasse 1.000 W/m², a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito elevam-se para 487,5 V e 7,5 A respectivamente. Os valores de tensão e corrente de operação dos subsistemas nas condições padrão de teste podem ser observados no circuito elétrico da Figura 18.

Parâmetros elétricos		Valor do módulo FV (CPT)	Valor da série (CPT)	Valor da série com fator de segurança
Potência nominal	P _{máx} (W)	230	1.840	-
Tensão de operação	V _{mpp} (V)	41	328	410
Tensão de circuito	V _{oc} (V)	48,7	389,6	487,5
aberto				
Corrente de operação	I _{mpp} (A)	5,61	5,61	7,0
Corrente de curto- circuito	I _{sc} (A)	5,99	5,99	7,5

Tabela 2. Valores de operação dos subsistemas.



Figura 18. Valores de tensão e corrente elétrica de operação dos subsistemas nas condições padrão de teste (CPT).

Cada subsistema de 24 módulos é conectado a um inversor SMA Sunny Mini Central 5000A que realiza a conversão da corrente contínua em corrente alternada. A Tabela 3 fornece os dados técnicos das grandezas do inversor. A opção pelo inversor de potência máxima de 5.750 W em c.c., superior à capacidade de geração dos painéis FV, justificou-se pela necessidade de um equipamento que suportasse a tensão e a corrente gerada pelos painéis. A tensão máxima de entrada em c.c. do inversor é de 600 V, superior à tensão V_{oc} de 487,5 V do arranjo fotovoltaico. Já em relação à capacidade de corrente elétrica do inversor, cada subsistema possui uma corrente de curto-circuito de 22,5 A (considerando o fator de segurança), sendo que a corrente máxima em c.c. do inversor é de 26 A. A configuração do sistema com dois subsistemas de 3 strings e 8 módulos em série justificou-se pela capacidade do inversor, conforme descrito nos cálculos anteriores. Uma configuração alternativa seria dispor o sistema em dois subsistemas de 2 strings de 12 módulos em série. Porém, a tensão de circuito-aberto V_{oc} da série de geradores elevaria-se para 731 V, sendo portanto, superior à tensão máxima de entrada em c.c. do inversor.

O inversor SMA SMC 5000A é protegido com isolação galvânica e sua tecnologia permite o controle de temperatura ativa. Uma porta de saída RS 485 e/ou Bluetooth disponibiliza a opção de conexão do inversor a um sistema de aquisição de dados externo. Detalhes da aquisição de dados do sistema solar fotovoltaico serão descritos na Seção 3.1.8 na página 73.

Entrada (c.c.)	
Potência máxima em c.c. (@ cos φ=1)	5750 W
Tensão máxima de entrada em c.c.	600 V
Faixa de tensão admissível	246 V – 480 V
Tensão mínima de entrada / Tensão de entrada	211 V / 300 V
inicial	
Corrente máxima de entrada	26 A
Corrente máxima de entrada por string	26 A
Saída (c.a.)	
Potência de saída	5000 W
Potência aparente máxima	5500 VA
Tensão nominal em c.a.	220 V
Frequência de operação	60 Hz
Corrente máxima de saída	26 A
Balanço de potência	Sim
Eficiência	
Eficiência máxima ($\eta_{máx}$)	96,10%
Monitoramento de falta a terra / Monitoramento da	Sim / Sim
rede	
Proteção de polaridade reversa em c.c.	Sim
Dados gerais	
Dimensões (L / H / E)	468 / 613 / 242 mm
Faixa de operação de temperatura	-25 °C +60 °C /
Consumo interno (noite)	0,25 W

Tabela 3. Características elétricas do inversor SMA Sunny Mini Central 5000A.

3.1.6 Características dos módulos fotovoltaicos e integração na cobertura

A capacidade de produção de energia da casa Ekó é fornecida através 61 m² de geradores fotovoltaicos com módulos de silício monocristalino SunPower SPR 230 WHT de potência máxima de pico de 230 W (Figura 19). Os módulos são fabricados com uma série de 72 células solares de alta eficiência. A vantagem dos módulos SPR 230 está na sua eficiência e potência de saída, demonstrando ser acima de 50 % quando comparados a outras tecnologias de módulos fotovoltaicos. A alta eficiência dos módulos SunPower justifica-se pela tecnologia utilizada na fabricação. Estes módulos são fabricados com células de silício com contato posterior. Nesta tipologia de módulo, os contatos metálicos que conduzem a corrente elétrica para um circuito externo são impressos na parte posterior da célula, fazendo com que nenhum tipo de sombreamento interfira na eficiência, o que permite uma melhor captação da radiação solar incidente nos módulos.

Os módulos fotovoltaicos da casa Ekó foram projetados com inclinação de 15°. Esta não é considerada a inclinação ideal anual para Madri, mas devido às limitações arquitetônicas derivadas do envelope solar, este ângulo foi aproximado do ideal. Contudo, esta inclinação foi ajustada para as estações do ano com maior irradiação solar, maximizando a produção anual de eletricidade e compensando os períodos de menor produção. Cinco diferentes inclinações são controladas pela estrutura de sustentação dos módulos fotovoltaicos: 10°, 15°, 20°, 25° e 30°, o que permite o ajuste dos módulos com inclinações ideais para diferentes latitudes. A direção geográfica exata pelo qual os módulos são alocados depende da latitude do local de operação do sistema solar FV. Para a latitude de Madri de 40,42° N, os módulos devem ser direcionados ao Sul geográfico (°: 180°) devido à posição do Sol no hemisfério norte.



Figura 19. Módulo SunPower SPR 230 WHT. A_G : 1,27 m², A_{GT} : 61 m², η_G : 18,5%.

Os módulos SunPower SPR 230 WHT são constituídos de células monocristalinas laminadas. A face frontal dos módulos é constituída de 3,2 mm de vidro temperado e as molduras são fabricadas em alumínio anodizado tipo 6063. A caixa de junção é provida de diodos bypass opcionais. A Figura 20 fornece informações sobre as características de tensão e corrente em alguns níveis de irradiação solar incidente com dependência da temperatura das células.



Figura 20. Módulo SunPower SPR 230 WHT: Curva característica I x V. Fonte: Sunpower Corporation.

Conforme descrito na Seção 2.3, página 38, os módulos fotovoltaicos conectados em série em uma string podem sofrer perdas por *mismatch*. Esse efeito corresponde à diminuição da potência total do sistema quando comparada com a soma das potências individuais de todos os módulos associados devido às diferenças elétricas entre os módulos e possíveis sombreamentos (RAMPINELLI & KRENZINGER, 2006). Os módulos somente operam no mesmo ponto de máxima eficiência na medida em que suas características elétricas apresentam poucas variações. A fim de verificar os efeitos de perdas por *mismatch* nos módulos fotovoltaicos, foram realizados ensaios elétricos em laboratório. Foram medidas as curvas características I x V de uma amostra de 8 módulos conectados em série, representando a operação de uma das 6 strings do sistema. A potência nominal esperada do gerador é de 1.840 W.

As medições foram realizadas no laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF) da USP em São Paulo no dia 19 de abril de 2012. A faixa de irradiação nos horários de medição estava na faixa de 860 a 1.010 W/m². Os módulos foram medidos com a mesma inclinação do sensor de irradiação de silício monocristalino (sensor ISET 01561). Os módulos e sensores com mesma tecnologia de células fotovoltaicas e com mesma inclinação apresentam a mesma perda por descasamento de espectro e consequentemente a mesma perda de irradiância pelo ângulo de incidência.

O resultado da medição está mostrado na Figura 21. A curva vermelha representa a medida realizada nas condições climáticas de realização do ensaio, com temperatura e irradiância solar de 53,2°C e 883 W/m² respectivamente. A potência máxima pode ser obtida nestas condições e alcançou um valor de 1.360 W, com uma corrente máxima de 4,87 A e uma tensão máxima de 280 V. O erro associado à potência nominal nas condições padrão de teste fornecido pelo fabricante é de 15 %. O erro ocorre principalmente em razão da diferença da inclinação dos painéis no laboratório (10°) em relação à inclinação ideal de São Paulo e às perdas nos condutores elétricos. Todavia, as perdas por *mismatch* podem também ter influenciado no erro da potência nominal medido na string.

A curva roxa representa valores extrapolados e ajustados para as condições padrão de teste, ou seja, a temperatura das células e a irradiância são corrigidas pelo medidor para 25°C e 1.000 W/m² respectivamente. Nestas condições, considera-se a potência de pico de saída da string. O valor da potência de pico medido foi de 1.769 W, representando uma média de 221,2 W por módulo, com tensão e corrente máxima de 321 V e 5,5 A respectivamente.



Figura 21. Medição de curva I x V de 8 módulos em série representando uma string do sistema. Curva vermelha: medida realizada nas condições climáticas de realização do ensaio (temperatura ambiente: 53,2°C, irradiância solar: 883 W/m²). Curva roxa: valores extrapolados, ajustados para as condições padrão de teste (CPT). Inclinação dos painéis: 10°. Local de medição: São Paulo - SP.

Os módulos fotovoltaicos obedecem ao envelope solar disponível pela edificação e foram instalados de uma maneira rápida e com pouca mão-deobra. Para efetuar a integração dos módulos na cobertura foram utilizados grampos metálicos desenvolvidos pela equipe brasileira. As molduras metálicas dos módulos fotovoltaicos foram perfuradas para introdução dos grampos. Assim, os módulos foram encaixados e fixados na estrutura metálica da cobertura. A Figura 22 mostra a integração dos módulos fotovoltaicos na estrutura metálica da casa. Os módulos são ventilados naturalmente na face inferior através das aberturas laterais presentes na cobertura. Este é um fator decisivo na operação do sistema em razão da influência do aumento da temperatura na eficiência dos módulos e no desempenho global final. A estrutura de alumínio para integração dos módulos fotovoltaicos e dos tubos evacuados pode ser observada pela Figura 23 no qual é constituída de três estruturas de alumínio fixadas sobre trilhos metálicos instalados na cobertura. A Figura 24 apresenta uma vista geral da integração dos módulos fotovoltaicos na edificação durante a competição Solar Decathlon Europe 2012. Os módulos fotovoltaicos instalados na parte inferior da estrutura, mais próximos da fachada Sul principal, proporcionam sombreamento nas janelas sendo este um fator importante a ser considerado a fim de reduzir a carga térmica no verão e o consumo de resfriamento.



Figura 22. Integração dos módulos fotovoltaicos na edificação: Módulos fotovoltaicos fixados na estrutura metálica da cobertura ventilados naturalmente.



Figura 23. Estrutura metálica da cobertura para integração do sistema solar da edificação (módulos fotovoltaicos e tubos evacuados).



Figura 24. Vista geral de integração dos módulos fotovoltaicos na edificação operando em clima mediterrâneo continental de Madri, Espanha.

3.1.7 Sistema de aterramento, proteção elétrica e método de fiação

O sistema de aterramento foi projetado para proteger o sistema solar fotovoltaico contra danos causados por descargas atmosféricas e aos usuários contra choques nos condutores elétricos ou na estrutura metálica causados por curto-circuito ou sobretensões. Foi utilizado como ponto de terra a estrutura metálica que suporta os módulos fotovoltaicos. Todos os componentes do sistema de fotovoltaico que necessitam de aterramento (inversores, módulos fotovoltaicos e estruturas metálicas) são conectados ao barramento de equipotencial principal do quadro elétrico 1 (QE1) ou *Electrical Panel* 1 (EP1), localizado no gabinete técnico da casa. O aterramento geral (hastes de terra e conectores) foi instalado pela comissão organizadora do Solar Decathlon no terreno da casa da equipe brasileira. O esquema de aterramento da edificação realizado pela equipe brasileira pode ser verificado na Figura 25.



Figura 25. Casa Ekó: Sistema de aterramento. Fonte: *Project drawings* do projeto Ekó House (modificado).

Uma das características dos módulos SunPower SPR 230 é o aterramento no pólo positivo. Os terminais com pólo positivo de cada arranjo fotovoltaico do sistema são integrados no aterramento dos inversores através de um kit de aterramento disponibilizado pelo fabricante dos inversores (Figura 26 (a)). O kit possui um fusível, integrado no circuito elétrico, que substitui os varistores de proteção dos inversores. O kit é instalado em paralelo com o circuito elétrico do inversor, conforme Figura 26 (b), impedindo que surtos de pequena duração o atinja, agindo assim como um limitador de tensão. A integração do aterramento dos módulos com os inversores facilita a instalação dos condutores de aterramento e também proporciona uma maior confiabilidade no sistema, principalmente em casos de descargas atmosféricas que possam danificar os componentes do sistema fotovoltaico.



Figura 26. Kit de aterramento do inversor SMA Sunny Mini Central: (a) Acessórios (b) Integração no circuito elétrico do inversor.

O quadro elétrico do sistema fotovoltaico foi projetado para efetuar a proteção individual dos dois subsistemas, assim como dos inversores. Para efetuar a proteção no lado c.c. foram previstos três disjuntores para garantir proteção contra sobrecarga nos módulos fotovoltaicos e nos condutores c.c. Os disjuntores foram dimensionados para cada subsistema em função da corrente de curto-circuito máxima de 7,5 A, sendo atribuído um disjuntor de 10 A por string, de modelo Schneider Electric Acti 9 C60H-DC com curva C. Foram também previstos três dispositivos de proteção contra surtos (DPS) por subsistema a fim de evitar danos causados por descargas atmosféricas nos módulos fotovoltaicos e inversores (DPS Schneider Electric PRD-DC, U_n: 600V DC e I_{sc}: 10 kA). No lado c.a. foram dimensionados dois disjuntores de 32 A para cada subsistema, considerando a corrente máxima de saída em c.a. dos inversores de 26 A. Os disjuntores utilizados foram da Schneider Electric, modelo Acti 9 C60H-DC com curva C e U_n de 500 V. Ainda no lado c.a., foi selecionado um disjuntor geral de 70 A (Schneider Electric Acti 9 C60H-DC) para proteger todo o sistema solar fotovoltaico.

A Figura 27 mostra os componentes elétricos de proteção do quadro elétrico EP1. A primeira fileira do quadro foi destinada à proteção geral de entrada de energia da edificação. Esta proteção é constituída de um disjuntor de 80 A (P1) que recebe a energia produzida pelo sistema solar fotovoltaico, um disjuntor de 70 A (P2) de entrada de energia da rede elétrica e um disjuntor geral da casa de 70 A (P3). Na segunda fileira foram instalados os medidores de energia elétrica produzida e consumida pela casa, com disjuntores de proteção c.a. dos inversores, um DR proteção geral da casa de 100 A e sensibilidade de 300 mA e um DPS classe 1 de 20 kA de corrente máxima. Neste quadro elétrico foram também instalados disjuntores de proteção de algumas cargas elétricas como a máquina de lavar roupas, luminárias externas e dois medidores de energia destinados a determinar o consumo de cargas elétricas individuais.
Para garantir proteção contra sobrecarga nos módulos fotovoltaicos e nos condutores c.c., foram dimensionados condutores elétricos com duplo isolamento de XLPE, com tensão de isolamento de 1 kV. Foram previstos cabos de 6 mm² para as conexões em c.c. desde os módulos fotovoltaicos até os inversores. Os condutores dos polos positivo e negativo dos módulos fotovoltaicos são constituídos de cabos Multi Contact de seção transversal de 5,26 mm² (10 AWG), tensão de isolamento de 600 V, capacidade máxima de 15 A e resistência à radiação solar (raio infravermelho e raio ultravioleta). Os condutores no lado em c.c. são protegidos por eletrodutos metálicos flexíveis para que não sejam expostos às influências externas. Estes eletrodutos são dispostos em contato com a estrutura metálica da cobertura. Este contato foi atribuído para garantir um potencial de Terra uniforme com a estrutura metálica da casa.



Figura 27. Quadro elétrico EP1 de entrada de energia, proteção do sistema solar fotovoltaico e proteção das cargas externas da edificação.

3.1.8 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados foi configurado para monitorar o sistema fotovoltaico durante sua operação. O objetivo deste sistema é de coletar dados de operação do sistema solar fotovoltaico relacionado à geração solar

fotovoltaica, potência elétrica de saída dos módulos fotovoltaicos, potência elétrica de saída dos inversores, temperatura dos módulos fotovoltaicos, velocidade do vento e temperatura ambiente. A capacidade de monitoramento do sistema é especialmente importante porque muitos sistemas fotovoltaicos não são inspecionados e controlados fora do local. O sistema apresenta resultados sobre o nível de tensão do sistema FV no lado c.c. e, após a conversão de energia no lado c.a., oferece informações sobre as configurações elétricas dos inversores, como por exemplo, a energia elétrica produzida e dados históricos de operação do sistema. Dentre as principais vantagens do sistema de aquisição de dados estão a identificação de potenciais problemas e o aumento da produção da planta fotovoltaica. Ao monitorar a planta fotovoltaica, os parâmetros elétricos do lado c.c. e c.a. podem ser coletados dando uma perspectiva do desempenho do sistema de geração. Assim, os dados de geração de eletricidade podem ser comparados com outras variáveis, como por exemplo, informar o usuário sobre o nível de geração de energia elétrica capaz de suprir o consumo energético diário da edificação.

Os componentes elétricos do sistema de aquisição de dados são conectados a um barramento de comunicação RS485. Os inversores SMA SMC 5000A possuem um barramento RS485 na placa de comunicação. Um cabo de comunicação do tipo ethernet é utilizado para realizar a captura dos dados dos inversores. A configuração do barramento RS485 é mostrada na Figura 28. Em uma das extremidades do barramento encontra-se o Sunny WebBox. Na outra extremidade encontra-se o Power Injector, um componente destinado a alimentar os sensores do sistema de aguisição de dados. O Sunny WebBox é o centro de comunicação utilizado para monitorar o sistema solar fotovoltaico. Este dispositivo monitora continuamente todos os dados relativos aos inversores e aos sensores. Os dados de geração solar fotovoltaica diários são armazenados na memória do Sunny WebBox em formato .csv. O intervalo de medição pode ser configurado entre 5 a 15 min. A conexão com o Sunny WebBox é realizada através de um computador local conectado diretamente ao dispositivo ou através de uma rede ethernet. Neste estudo de caso, o Sunny WebBox foi configurado com as características da rede ethernet da casa (endereço IP, máscara de sub-rede). Assim, qualquer microcomputador conectado à rede ethernet local é capaz acessar o sistema de monitoramento do sistema.

Os dados monitorados pelo sistema de aquisição de dados durante o Solar Decathlon foram utilizados neste trabalho para a avaliação do comportamento energético da casa. Os dados avaliados são os seguintes: potência de entrada e saída dos inversores (W), geração de energia elétrica (kWh), radiação solar (W/m²), temperatura dos módulos fotovoltaicos (°C) e temperatura ambiente (°C). Estes dados foram analisados durante o período do Solar Decathlon e comparados com dados simulados no EnergyPlus para verificação da

compatibilidade dos resultados. A seção a seguir apresenta os detalhes da estação solarimétrica instalada na edificação.



Figura 28. Configuração do sistema de aquisição de dados com barramento RS485. Fonte: *Project drawings* do projeto Ekó House (adaptado).

3.1.9 Estação solarimétrica

Uma estação solarimétrica foi instalada na edificação para monitoramento das variáveis climáticas locais. A Figura 29 mostra o planejamento do sistema de aquisição de dados da casa com a distribuição dos sensores da estação solarimétrica na cobertura. O *Sunny SensorBox* é um sensor que possui uma célula fotovoltaica de referência de a-Si. Sua função é medir os parâmetros de radiação solar incidente no plano dos módulos fotovoltaicos. Com isso, é possível determinar a influência da radiação solar na produtividade final e no desempenho global do sistema. Este sensor foi instalado na cobertura da edificação com a mesma inclinação dos módulos fotovoltaicos conforme Figura 30 (a). Outros sensores foram conectados ao Sunny SensorBox, destinados a monitorar as condições climáticas pelo qual se encontra o sistema solar fotovoltaico. Os sensores são os seguintes: sensor de temperatura do módulo FV, sensor de temperatura ambiente e sensor de velocidade do vento.

O sensor de temperatura dos módulos é um sensor com resistência de Platina Pt100 com precisão de 0,5 % e intervalo de temperatura de 20°C a 110°C. Conforme Figura 30 (b), este sensor foi instalado abaixo de um módulo do arranjo FV. O monitoramento da temperatura dos módulos FV é um parâmetro que pode detectar problemas no sistema devido sua influência na eficiência de conversão fotovoltaica e na potência elétrica de saída conforme demonstrado

pelas Equações 6 e 7. De fato, a temperatura do módulo pode variar o desempenho global do sistema e a produção de energia elétrica final.



Figura 29. Planejamento do sistema de aquisição de dados na casa Ekó. Fonte: *Project drawings* do projeto Ekó House.



Figura 30. Sensores da estação solarimétrica: (a) Célula de referência para medição de irradiação solar no plano inclinado. (b) Sensor Pt100 de temperatura dos módulos fotovoltaicos (T_{mod}).

3.1.10 Consumo de energia elétrica

Em uma edificação residencial, o consumo total de energia elétrica E_c é a energia necessária para satisfazer as necessidades dos ocupantes da

edificação. Neste trabalho, E_c é dividido em três grupos de cargas elétricas: energia elétrica para equipamentos eletroeletrônicos, incluindo componentes do sistema de aquecimento de água (E_{eletro}); energia elétrica para sistema de iluminação (E_{ilum}) e energia elétrica para o sistema de condicionamento de ar ($E_{cond-ar}$):

 $E_c = E_{eletro} + E_{ilum} + E_{cond-ar}$ (14)

A medição do consumo de energia elétrica total da casa Ekó foi realizada pela organização da competição Solar Decathlon. A organização do evento utilizou um medidor de potência monofásico com comunicação remota de pulsos RS485, modelo Orbis Domotax. Os dados do consumo total da edificação foram monitorados diariamente durante o período da competição e registrados em um banco de dados. Para realizar a aquisição dos dados, foi utilizado um CLP conectado ao medidor. Os dados foram ainda disponibilizados na internet no site do Solar Decathlon Europe 2012 (www.sdeurope.org).

Com o objetivo de determinar o consumo de energia elétrica das cargas elétricas da edificação foram instalados medidores eletrônicos com display LCD modelo SE ME1zr para medir o consumo diário de cargas individuais ou para um grupo de cargas conectados no mesmo medidor. Os dados de consumo destes medidores auxiliaram na estimativa de consumo das cargas elétricas assim como para o desenvolvimento das simulações. Foram instalados dez medidores ME1zr divididos nos seguintes grupos de cargas: (1) Sistema de condicionamento de ar; (2) Iluminação externa, Máquina de lavar roupas e Quadro de automação 1 (AP1); (3) Cooktop; (4) Forno elétrico; (5) Máquina de lavar louças; (6) Refrigerador/Freezer; (7) TUG's; (8) Iluminação interna; (9) TV/DVD/PC e (10) Quadro de automação 2 (AP2) e persianas motorizadas.

3.2 Simulações térmicas e energéticas no programa EnergyPlus

O programa EnergyPlus simula o comportamento energético e a utilização de energias renováveis em edificações. O programa foi desenvolvido pelo Laboratório Lawrence Berkeley dos Estados Unidos. Seu desenvolvimento começou em 1996 com base em dois programas: DOE-2 e BLAST (CRAWLEY et al., 2001). As aplicações em energia solar incluem simulações com sistemas fotovoltaicos térmicos e de geração de energia elétrica. Na Europa e em diferentes partes do mundo, o programa foi testado com base em dados experimentais, resultados empíricos e resultados de outros programas computacionais. O programa foi também testado usando a série de testes da Agência Internacional de Energia (IEA HVAC BESTEST) (HENNINGER et al., 2004).

Através dos objetos desenvolvidos no EnergyPlus, podem ser realizados cálculos da carga de aquecimento e resfriamento necessária para manter o controle térmico do ambiente, cálculos da energia consumida pelos equipamentos responsáveis por esse controle e vários outros parâmetros necessários para a análise térmica da construção. Ele é baseado nas descrições da construção e de outros parâmetros descritos pelo usuário, como por exemplo, a descrição dos materiais utilizados nas paredes, cobertura, domos e vidros, assim como as variáveis climáticas do local de projeto. Além disso, o programa possui uma biblioteca versátil com diversos modelos comerciais de janelas, vidros, argamassas, concretos e telhas. O controle da luz natural (incluindo cálculos da iluminância interior), controle do brilho das luminárias e o efeito da iluminação artificial são também propostos pelo programa.

Para realizar a modelização de sistemas de condicionamento de ar (HVAC) e sistemas solares fotovoltaicos no ambiente do EnergyPlus, modelos matemáticos de diferentes componentes incorporados no programa são utilizados como bombas de calor, trocador de calor e arranjos fotovoltaicos (EnergyPlus engineering reference, 2001).

As simulações no EnergyPlus exigem alguns fatores que devem ser seguidos a fim de avaliar condições reais de operação nas edificações. Dentre estes fatores estão as características construtivas e geográficas da construção, as dimensões físicas e as variáveis climáticas. As variáveis de entrada e saída do programa, referentes ao estudo de caso proposto, serão descritas nas próximas seções. Neste estudo, foram empregadas simulações com a versão 6.0 do EnergyPlus.

3.2.1 Arquivo climático de Madri e características climáticas

As condições climáticas de Madri estabelecem as condições para a geração solar fotovoltaica no período da competição Solar Decathlon. Paralelamente, as influências climáticas externas exercem influência significativa na demanda de energia elétrica diária consumida pela edificação. Os fatores que influenciam a demanda de energia de uma edificação não são apenas dirigidos pela temperatura do ar externo. Umidade relativa, velocidade e direção do vento, radiação solar direta e indireta e o calor refletido pelo solo são também parâmetros que devem ser considerados.

O clima de Madri é classificado como mediterrâneo continental, com temperaturas que podem chegar a 35°C nos períodos mais quentes do ano. Os verões são cálidos e secos e as precipitações são escassas, mas bem distribuídas ao longo do ano. A temperatura média máxima anual é de 19,5°C e a mínima anual de 9,5°C. Janeiro é o mês mais frio com temperaturas que

oscilam entre 2°C e 9°C. O mês de julho é normalmente o mais quente, com temperatura entre 18°C e 32°C. O mapa de irradiação solar global horizontal da Espanha pode ser visualizado na Figura 31. A soma da média anual de irradiação solar em Madri está na faixa de 1.800 kWh/m², sendo equivalente a um dos valores mais elevados do território espanhol.



Figura 31. Mapa de irradiação solar global horizontal da Espanha. Fonte: Solargis.

Para o desenvolvimento das simulações realizadas neste trabalho utilizou-se o arquivo climático TMY2 de Madri do ano de 2012. O arquivo climático TMY2 de Madri foi obtido através da estação climática Weather Analytics 581525 localizada sob uma elevação de 728 m, latitude 40,42 S e longitude - 3,75 O disponível no website http://www.weatheranalytics.com. A distância entre a estação climática e a edificação localizada na casa de Campo (latitude 40,41 N e longitude - 3,72 O) é de aproximadamente 2 km conforme indicado pela Figura 32. Entre os dados climáticos contidos no arquivo climático TMY2 estão a direção e velocidade do vento, a irradiância solar, a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa do ar.

Algumas características climáticas de Madri são apresentadas na Figura 33 indicando a média anual da temperatura de bulbo seco e a média anual da umidade relativa. Os maiores valores observados de temperatura de bulbo seco ocorrem entre junho e setembro durante o verão e os menores valores encontram-se nos períodos de inverno entre dezembro e fevereiro. O menor

valor de umidade relativa em Madri é menor que 40 % em julho e agosto. Por isso, o clima é predominante seco no verão. Já no inverno a umidade relativa pode ultrapassar os 70 %.

As diferenças entre a irradiância solar direta normal e a irradiância solar difusa horizontal foram verificadas pela Figura 34. Nestas análises foram empregadas simulações no EnergyPlus com o arguivo climático de ano de referência SWEC (Spanish Weather for Energy Calculations) de Madri gerando valores da média mensal de irradiância solar. Através da figura, observa-se que os maiores níveis de irradiância solar direta normal e difusa horizontal ocorrem entre os meses de junho a setembro, períodos nos quais ocorrem as maiores médias de temperatura de bulbo seco na região. A irradiância solar global (Ghor) pode ser determinada pelo produto entre a irradiância direta normal e o cosseno do ângulo zenital² somado com a irradiância solar difusa. Para uma determinada localidade (latitude, longitude), em qualquer período do ano, o ângulo azimutal e a altitude solar podem ser determinados de modo com que a irradiância solar total (Gtot) em uma superfície inclinada depende também da componente refletida pelo solo, água ou edificações (albedo local). Assim, guanto maior é a refletividade da radiação solar nos arredores maior será a intensidade da irradiância solar difusa.



Figura 32. Localização da estação climática Weather Analytics e do local da competição Solar Decathlon em Madri, Espanha. Distância aproximada entre a estação climática e a edificação: 2 km.

² Ângulo Zenital é o ângulo formado entre o Zênite local e os raios solares incidentes em uma superfície horizontal.



Figura 33. Distribuição mensal da média da temperatura de bulbo seco e da média da umidade relativa de Madri.





3.2.2 Modelo de simulação da edificação

Para efetuar simulações no programa EnergyPlus, inicialmente modela-se a geometria e os componentes construtivos do modelo. A modelagem pode ser realizada através de coordenadas cartesianas no próprio programa ou com a utilização do plug-in compartilhado com o programa *Google SketchUp*. O modelo tridimensional (3D) da casa Ekó foi desenvolvido pela equipe brasileira

no Google SketchUp e pode ser visualizado pela Figura 35. O modelo mostra os detalhes das obstruções solares (brises) verticais de bambu, construídos nas fachadas norte, leste e oeste, assim como o sombreamento determinado pela cobertura e pelo gabinete técnico (superfícies roxas). As superfícies em amarelo constituem as paredes externas que são expostas à radiação solar, aos efeitos do vento e de umidade. Finalmente, as superfícies em azul constituem os vidros das portas e janelas.



Figura 35. Modelo de simulação da edificação: (a) Fachada principal Sul, (b) Fachada Norte, (c) Fachada Leste, (d) Fachada Oeste.

3.2.3 Construção e materiais

A envoltória e o período de operação do sistema de aquecimento e resfriamento são parâmetros importantes que afetam o consumo de energia elétrica total da edificação (MANIOĞLU & YILMAZ, 2006). A envoltória da casa Ekó foi projetada para proporcionar conforto térmico no interior da edificação e economia de energia elétrica, sobretudo com o sistema de condicionamento de ar. Desta forma, a espessura do isolamento térmico das paredes, piso e teto são parâmetros otimizados neste estudo (BAMBROOK et al., 2011). Os isolantes térmicos utilizados na construção da casa são destinados tanto à regiões com clima frio quanto para regiões com clima quente. Em regiões quentes os materiais isolam o interior da edificação do calor externo e devido a utilização de isolamento na envoltória da casa, os materiais podem ser aplicados no clima (sub)tropical brasileiro. Os isolantes utilizados na

construção, com suas respectivas espessuras, podem ser visualizados na Figura 36.



Figura 36. Composição das camadas de construção da envoltória.

Conforme indica a Figura 36, as paredes externas são revestidas com isolamento de aerogel. O aerogel é um isolante térmico e acústico com resistência térmica e mecânica elevada, pelo qual suporta temperaturas na ordem de 1.200°C. Devido a sua baixa condutividade térmica (0,014 W/m.K a temperatura ambiente), o aerogel é um material atrativo para a construção de paredes com alto desempenho térmico (REIM et al., 2002). No nível de isolamento acústico, a absorção do som aumenta com a área de superfície exposta ao som e devido à alta porosidade do aerogel as ondas sonoras são absorvidas e atenuadas (RIFFAT & QIU, 2012). No entanto, o aerogel é vulnerável à tensão, à tração e à umidade, podendo deteriorar-se rapidamente se a água ou o vapor da água entrar em contato com o material. Por outro lado, a matéria prima para fabricação do aerogel é abundante, mas o processo de fabricação é bastante caro. É possível observar a aplicação de isolamento de aerogel pela Figura 37 em uma das etapas de construção das paredes da casa Ekó.



Figura 37. Processo de construção da parede com isolamento de aerogel.

Internamente, a casa é constituída com uma camada de 60 mm de lã de vidro. Assim como o aerogel, a lã de vidro é um bom isolante térmico e acústico, mas com um desempenho térmico muito menor. Sua condutividade térmica está entre 0,032 e 0,044 W/m.K⁻¹ (SELLÉ, 2011). A lã de vidro é obtida por fibras de vidro entrelaçadas formando um material flexível e robusto com consistência lanosa. A Figura 38 mostra a introdução de isolamento de lã de vidro no piso do módulo 2 da casa em uma das etapas de construção no IEE.



Figura 38. Processo de construção do piso com isolamento de lã de vidro.

A casa Ekó foi construída com painéis estruturais de OSB (*Oriented Strand Board*), com 18 mm de espessura e concebida para oferecer maior versatilidade de uso. O OSB é um material derivado de madeira, composto por pequenas lascas de madeira orientadas segundo uma determinada direção (Figura 39). É um produto bastante usado na construção de edifícios de madeira, devido a sua facilidade de aplicação. Os painéis OSB não possuem

lacunas ou vazios internos, e são resistentes à água, embora requeiram produtos adicionais de impermeabilização, e por isso não são recomendados para utilização externa. O produto acabado tem propriedades semelhantes à madeira compensada, mas é mais uniforme e mais barato.



Figura 39. Placa de OSB.

Após a instalação da placa de madeira OSB e de uma barreira de vapor impermeável à ação direta da água, a estrutura da casa utiliza o ar como isolante térmico a fim de diminuir a transferência convectiva entre o ambiente externo e interno. Graças à baixa condutividade térmica do ar este constitui um elemento muito resistente à passagem de calor. Na teoria, o ar e outros gases, na ausência de convecção, geralmente são bons isolantes térmicos. Entretanto, o fenômeno de convecção que se origina nas câmaras de ar aumenta sensivelmente sua capacidade de transferência térmica.

O revestimento interno e externo da casa é constituído de placas de fibrocimento. O fibrocimento é um composto natural feito de areia, cimento e fibras de celulose. O material é resistente a impactos, umidade e temperaturas extremas e não sofre corrosão com água. Conforme indicado pela Figura 40, as placas de fibrocimento possuem um suporte metálico fixado em estrutura de peças de cumaru combinada com painéis de OSB.



Figura 40. Placa de fibrocimento e estrutura de fixação para revestimento da parede externa.

A construção da edificação no EnergyPlus é realizada na classe de objetos *Construction*. As variáveis deste objeto são inseridas na mesma ordem das camadas de materiais da Figura 34, a qual exerce influência significativa nos cálculos de desempenho térmico e energético. As propriedades físicas de cada material devem ser especificadas no programa conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4. Propriedades físicas dos materiais e isolantes.

	Placa fibro-cimento	Aerogel	OSB	Lã de vidro
Rugosidade	Média	Média	Média	Média
Condutividade (W/m ² .K)	0,65	0,014	0,013	0,038
Densidade (Kg/m ³)	1400	-	650	20
Calor específico (J/Kg.K)	840	-	1300	670
Absortância térmica	0,9	0,9	0,9	0,9
Absortância solar	0,7	0,7	0,7	0,7
Absortância visível	0,7	0,7	0,7	0,7

As janelas são constituídas de vidros duplos de baixa emissividade (*low emissivity glass* ou *LowE*) e esquadrias de PVC. Os vidros LowE são constituídos de uma camada de 6 mm de vidro, uma camada de 13 mm de gás argon e mais uma camada de 6 mm de vidro. Estes vidros possuem uma camada de filme fino de óxido metálico aplicado em uma das faces do vidro, quase invisível, que age como um filtro, bloqueando a radiação com grande comprimento de onda (infravermelho) e permitindo a passagem da radiação com baixo comprimento de onda (ultra-violeta e luz visível) (REUK, 2012). Esta configuração de vidros ajuda a manter a casa aquecida no inverno e fresca no verão, garantindo um desempenho térmico melhorado. Algumas propriedades das janelas que são utilizadas nas simulações no EnergyPlus estão especificadas na Tabela 5.

Local	Área de vidro (m²)	Transmitância térmica dos vidros (W/m ² .K)	Condutância das esquadrias (W/m ² .K)	Ângulo azimutal (ºC)
Janela leste	4,52	1,32	0,88	270
Janela quarto 1	1,27	1,32	0,88	0
Janela quarto 2	1,27	1,32	0,88	0
Janela oeste	8,64	1,32	0,88	90
Janela sul	11,7	1,32	0,88	180
Janela cozinha	2,01	1,32	0,88	0
Janela banheiro	1,69	1,32	0,88	0

Tabela 5.	Propriedades	físicas	das	janelas	j.,
-----------	--------------	---------	-----	---------	-----

A orientação da edificação é outro fator importante que determina o desempenho do ambiente térmico e o consumo de energia elétrica (WANG et al., 2009). A orientação da casa refere-se à direção em que a fachada de entrada principal é disposta. É possível simular uma edificação variando a orientação solar com o objetivo de analisar o impacto da carga de aquecimento e resfriamento no consumo de energia elétrica. Wang et al. (2009), em um estudo de caso de um edifício à energia zero em Cardiff, Inglaterra, determinaram através de simulações no EnergyPlus uma economia de energia anual de aquecimento de 26,5 % orientando uma fachada passiva na direção ideal e melhorando a transmitância térmica dos vidros e do telhado. Através de outros estudos presentes na literatura, constatou-se que a posição e as dimensões das aberturas da casa (portas e janelas) representam influência significativa nos resultados devido ao ganho de calor interno proporcionado pela radiação solar incidente. Todavia, este tipo de conclusão

não será objeto de análise deste estudo. As simulações no EnergyPlus foram realizadas com a fachada principal da edificação orientada ao Sul geográfico. Esta direção foi referenciada como a ideal, pois representa a melhor orientação anual para captação de irradiação solar nos módulos fotovoltaicos instalados na cobertura segundo a latitude de Madri.

O controle do ganho solar, através de janelas e portas, tem impacto significativo na demanda de aquecimento e resfriamento. O controle solar pode ser definido conforme a disponibilidade solar da região. Como a competição Solar Decathlon foi realizada no verão de Madri, região que apresenta níveis muito altos de radiação solar, houve a necessidade de utilização de persianas nas janelas para otimizar o desempenho térmico e energético da casa. Foram utilizadas persianas horizontais motorizadas na fachada Sul principal, no qual permitem bloquear a radiação solar no verão. Da mesma maneira, o controle da abertura das persianas pode aproveitar a luz solar para aquecer a casa no inverno. Assim, devido à necessidade de abertura e fechamento das persianas, foi implementado na casa um sistema de controle. Neste sistema, um sensor fotoelétrico capta a quantidade de radiação solar incidente no ambiente interno da casa e orienta a abertura e o fechamento das persianas. Esta estratégia pode reduzir consideravelmente o consumo de condicionamento de ar, já que o bloqueio da irradiação solar pelas persianas pode reduzir consideravelmente a carga térmica do sistema de condicionamento de ar mantendo as condições recomendadas de temperatura e umidade relativa internas ao ambiente. A ABNT estabelece as condições de temperatura e umidade para o ar interno. As condições internas para inverno recomendadas pela ABNT são: temperatura de bulbo seco entre 20°C e 22°C e umidade relativa entre 35 % e 65 %. As condições internas para verão são: temperatura de bulbo seco entre 23ºC e 25°C e uma umidade relativa entre 26,5 % e 65 %.

O tipo de elemento de sombreamento implementado nas simulações foi determinado para otimização da carga anual de condicionamento de ar. As persianas na fachada Sul foram implementadas no modelo de simulação. As persianas são fechadas quando a radiação solar incidente nas janelas atinge um nível muito elevado e são abertas parcialmente em baixos valores de irradiação solar para aproveitamento da luz natural. Conforme a Figura 31, o modelo da casa também incorpora brises verticais de bambu nas fachadas Norte, Leste e Oeste que ajudam no bloqueio solar. Para introduzir um elemento de sombreamento no EnergyPlus, utiliza-se a classe de objetos *Window Property: Shading Control.* No programa, o efeito do dispositivo de sombreamento depende da posição do dispositivo (interior, exterior ou entre os vidros), sua transmitância térmica e refletância solar, e o montante de interreflexão entre o dispositivo de sombreamento e o vidro (EnergyPlus Engineering Reference).

3.3 Sistema solar térmico

O aquecimento de água apresenta um dos maiores gastos de energia nas residências, depois do aquecimento e resfriamento do ar, que são a primeira e segunda maior despesa, respectivamente. A maior parte das residências brasileiras utiliza eletricidade ou gás natural para o aquecimento da água, consumindo larga quantidade de energia convencional, pelo qual, em particular, a utilização de eletricidade para aquecimento de água pode ser considerado um desperdício (WANG et al., 2009). Desta forma, a aplicação de sistemas solares para aquecimento de água vem sendo muito discutido no Brasil. Segundo Wang et al. (2009), os sistemas de aquecimento de água são considerados um dos sistemas mais promissores para consignar o balanço positivo em edificações residenciais. Todavia, o consumo de energia para aquecimento de água pode ser reduzido ao selecionar um aquecedor de água eficiente, como uma bomba de calor ou coletores solares.

Levando em consideração a redução do consumo no aquecimento de água, foi instalado um conjunto de tubos evacuados Solterm na cobertura da casa utilizando a energia solar como fonte primária para o aquecimento da água conforme mostrado pela Figura 41. Os tubos foram instalados sob uma inclinação de 15º, paralelamente aos painéis fotovoltaicos, evitando com isso o sombreamento nos painéis adjacentes. Os tubos evacuados contém um fluído no interior que é aquecido pela radiação solar e em seguida transferido para um tanque de água contendo uma serpentina. O fluido aquece a serpentina, aquecendo a água no interior do reservatório em que se encontra imersa e onde é armazenada a água quente que é utilizada pela casa. O reservatório térmico armazena e mantém a água quente por algumas horas. O reservatório da casa foi determinado conforme as normas técnicas espanholas e é também uma das exigências da organização do SDE.



Figura 41. Sistema solar térmico com tubos evacuados instalado na cobertura da edificação. Inclinação: 15°; º: 180°.

3.4 Planejamento do funcionamento das cargas elétricas e ocupação

O tempo de funcionamento das cargas elétricas deve ser determinado para estimar o consumo de energia elétrica de uma edificação. Cada equipamento elétrico e sistema de energia elétrica apresenta uma contribuição no consumo energético diário. No EnergyPlus, o planejamento do funcionamento das cargas elétricas é realizado por um calendário através do objeto Schedule:compact, indicando o período do ano e o tempo de funcionamento diário de um conjunto de equipamentos e sistemas ou de equipamentos individuais.

O planejamento anual de funcionamento das cargas elétricas da casa Ekó foi elaborado levando em consideração o período e o tempo de cada equipamento. Além do planejamento das cargas elétricas consideradas neste trabalho, que compreendem os equipamentos elétricos, o sistema de iluminação e o sistema de condicionamento de ar, foram elaborados calendários para a taxa de infiltração, para a ocupação e para as persianas motorizadas. Para o sistema solar fotovoltaico, utilizou-se um calendário denominado *always_on*, designado para estabelecer o funcionamento dos geradores fotovoltaicos e inversores 24 horas por dia durante os 365 dias do ano.

A ocupação anual da casa foi designada para um casal, sendo que uma pessoa permanece em casa o tempo todo, enquanto a segunda pessoa trabalha fora, mas almoça e janta em casa. Durante os sábados e domingos considera-se um período de ocupação permanente. Não será considerado o período de férias, ou seja, considera-se que o casal mantém a rotina diária durante o ano inteiro. Os schedules elaborados para as simulações anuais indicam que o consumo de eletricidade dos equipamentos elétricos e do sistema de iluminação são realizados conforme o cotidiano do casal. Já em

relação ao sistema de condicionamento de ar, as simulações foram realizadas conforme a sazonalidade devido aos diferentes comportamentos de utilização do ar-condicionado durante o ano.

O planejamento das cargas elétricas no período da competição Solar Decathlon leva em consideração o período e o tempo de utilização das cargas conforme indicam as regras da competição. As regras indicam os horários pelo qual os equipamentos e os sistemas elétricos da casa devem funcionar e também os períodos que foram efetuadas medições para avaliações operacionais da casa.

As tarefas diárias desempenhadas na casa durante a competição, designadas com o uso de eletricidade, são também baseadas na vida cotidiana do casal. As tarefas incluem o uso da cozinha utilizando a geladeira, forno, fogão (*cooktop*) e a máquina de lavar louças. Na área de serviço, as tarefas são destinadas à utilização da máquina de lavar/secar roupas.

Os sábados e domingos da competição (22, 23, 29 e 30 de setembro) são destinados à visitação ao público e não são realizadas tarefas, porém as medições de monitoramento são continuamente avaliadas. Desta maneira, o consumo energético nestes dias é mais baixo em relação aos dias da semana, sendo que as cargas elétricas que operam na casa são essencialmente a geladeira/freezer, sistema de ar-condicionado, sistema de iluminação e quadros de automação e controle.

3.4.1 Equipamentos elétricos

Quando os recursos energéticos são conservados, é possível diminuir a dependência de fontes primárias de energia, ainda muito utilizadas, economizando energia com práticas de eficiência energética em edificações. No Brasil, o consumo de eletricidade no setor residencial apresentou um crescimento de 4,4 % em 2012 (BEN, 2012). Na Espanha, com o aumento populacional das últimas décadas, o consumo de energia elétrica acresceu em cinco vezes, devido principalmente ao incremento do uso de equipamentos eletroeletrônicos nas residências (IDAE, 2011).

Os equipamentos elétricos da casa Ekó foram selecionados para garantir um bom desempenho energético, já que representam grande parcela do consumo de eletricidade da casa. Os eletrodomésticos foram adquiridos no mercado brasileiro com classificação energética nível A do INMETRO. Os equipamentos disponíveis no mercado brasileiro são menos eficientes quando comparados com equipamentos disponíveis em outros países, porém a opção foi realizada para utilizar equipamentos disponíveis comercialmente no Brasil devido à proposta da casa Ekó ser posteriormente instalada no país. A Tabela 6 lista os equipamentos elétricos da casa, indicando o uso médio diário e o consumo médio diário durante o SDE, pelo qual são utilizados no planejamento dos schedules no EnergyPlus para determinação de E_{eletro}. O consumo médio diário foi calculado levando em consideração os resultados das medições efetuadas nos diversos equipamentos da casa. As medições foram efetuadas para um grupo de cargas conectados no mesmo medidor ou para equipamentos separados. Detalhes da descrição das medições podem ser encontrados na seção 3.1.10 da página 77. Através das medições de consumo de energia elétrica e da potência elétrica nominal de cada equipamento foi determinado o tempo de uso médio diário conforme indicado na tabela. O padrão de uso dos equipamentos elétricos da casa Ekó não coincide com o padrão de uso de uma residência típica brasileira devido aos diferentes modos de comportamento de água da tabela inclui uma bomba hidráulica com a função de transferir a água desde a cobertura até o reservatório térmico.

Carga elétrica	P _n (W)	Uso médio diário ¹	Consumo médio diário (kWh)	Consumo médio mensal (kWh)
Cooktop	5.760	20 min	1,8	54
Forno elétrico	3.570	15 min	0,9	27
Máquina de lavar louças	2.000	15 min	0,5 ²	15
Refrigerador/Freezer	180	9 h	1,6	48
TV/DVD/Comp.	156	4 h	0,65	19,5
TUG	300	4 h	1,3	39
AP2/Persianas	120	6 h	0,8	24
Quadro automação AP1	80	4 h	0,32	9,6
Máquina lavar roupas	1.500	1 h	0,29 ²	15
Sistema de cond. de ar	6.000	1,5 h	6,7	201
Aquecimento de água	720	1 h	0,53	15,9

Tabela 6. Características dos equipamentos eletroeletrônicos utilizados na edificação.

(1) Uso médio diário na potência nominal do equipamento.

(2) Consumo por ciclo de funcionamento (kWh/ciclo).

3.4.2 Sistema de iluminação

A edificação é constituída de um sistema de iluminação eficiente com lâmpadas LED (*Light-Emitting Diode*) em toda a extensão da casa. Estas lâmpadas apresentam uma potência muito baixa quando comparadas às lâmpadas convencionais. A vida útil das lâmpadas LED é de aproximadamente 50.000 horas a 25°C e o índice de reprodução de cor é bastante alto (ICR: 85% a 90%, para LED Branco com TC: 3.000 K).

A iluminação interna da casa utiliza luminárias dimerizadas via tensão da rede Philips *eW Cove Powercore* com lâmpadas LED de 4,5 W dispostas ao longo do eixo leste-oeste da casa (Figura 40). O diagrama polar da luminária da Figura 42 mostra a direção e a intensidade luminosa com fluxo luminoso de 177 lm. A eficácia luminosa da luminária eW Cove Powercore é de 30,7 lm/W e a temperatura de cor é de 4.200 K.

A casa possui alguns sensores de luminosidade instalados no teto. Através destes sensores, o sistema de automação e controle é capaz de aumentar ou diminuir a intensidade das lâmpadas conforme o nível de iluminância no interior da edificação. Devido ao controle do nível de iluminação interior, este tipo de sistema proporciona grande economia de energia elétrica em iluminação. A Tabela 7 especifica as características das luminárias e lâmpadas utilizadas na edificação.

Nas simulações no EnergyPlus foi considerada para a iluminação interna, uma potência média diária de utilização de 250 W, correspondendo a 80% da potência total instalada. Com um tempo de funcionamento médio de 3 horas, o consumo médio diário do sistema de iluminação interno é de 0,75 kWh. Por sua vez, o consumo médio estimado do sistema de iluminação externa é de 0,69 kWh, com 6 horas de utilização diária.



Figura 42. Luminária linear de LEDs *eW Cove Powercore* dimerizada e diagrama polar de direção e intensidade luminosa. P_{luminária}: 22,5 W.

Тіро	Fabricante/modelo	Qtd	Potência elétrica (W)	Тіро
LED	Phillips/eW Cove PowerCore 12"	12	270	Interno
LED	Phillips/Living Colors	1	7,5	Interno
LED	Phillips/Roomstylers	1	7,5	Interno
LED	Phillips/Master Led dimerizada	3	21	Interno
LED	Phillips/LuxSpace Mini square	2	38	Externo
	downlight			
LED	Phillips/Outerstyles 1727	3	21	Externo
LED	Phillips/Outerstyles 1728	7	56	Externo

Tabela 7. Características do sistema de iluminação.

3.4.3 Sistema de condicionamento de ar

O sistema de condicionamento de ar da casa consiste de um sistema com bomba de calor e duas unidades internas tipo cassete (split) montadas no teto da edificação, um localizado na entrada, entre a sala de jantar e a cozinha, e outro localizado entre o quarto e a sala de estar. O compressor da bomba de calor consome eletricidade originada pelo sistema solar FV e da rede elétrica nos momentos em que a geração solar é insuficiente para suprir a carga. As características do condensador, do compressor da bomba de calor e da unidade interna estão mostradas na Tabela 8. O sistema com bomba de calor funcionada conforme a Figura 43: um fluído no estado gasoso é pressurizado e através de um compressor circula através do sistema. O vapor é comprimido em um volume muito pequeno e então é aquecido. Assim, o vapor quente pode ser transferido para o sistema de aquecimento para aquecer a casa no inverno. No lado de descarga do compressor, o vapor quente e altamente pressurizado é resfriado em um trocador de calor, chamado de condensador. Então o vapor se condensa a uma pressão elevada gerando um líguido com temperatura moderada. Assim, o refrigerante condensado passa através de um dispositivo de redução de pressão ou válvula de expansão. O refrigerante líquido de baixa pressão entra no outro trocador de calor, o evaporador (split), localizado dentro da casa, no qual o fluido absorve o calor e evapora resfriando o ambiente. O refrigerante retorna ao compressor e o ciclo se repete (EGEC, 2008). Por sua vez, o ventilador efetua a circulação de ar, fazendo com que o ar a ser resfriado entre em contato com a serpentina do evaporador.

O consumo do sistema de condicionamento de ar $E_{cond,ar,d}$ é dividido em: consumo dos ventiladores do evaporador (split) ($E_{vent,d}$), consumo do compressor ($E_{compre,d}$) e consumo da bomba de calor com aquecimento ($E_{aque,d}$) ou resfriamento ($E_{resfr,d}$):

$E_{cond,ar,d} = E_{vent,d} + E_{compre,d} + E_{aque,d} (E_{resfr,d})$ (16)

	Qtd	Fabricante	Modelo	Potência nominal (kW)
Condensador	1	Daikin	RXYMQ6PVE	4,44 (resfriamento)
				4,82 (aquecimento)
Compressor da	1	Daikin	Scroll	
bomba de calor			hermeticamente	3,5
			selado	
Evaporador	2	Daikin	FXFQ63PVE	0,063 (resfriamento)
				0,053 (aquecimento)

Tabela 8. Sistema de condicionamento de ar.



Figura 43. Princípio de funcionamento do sistema de condicionamento de ar com bomba de calor (EGEC, 2008) (adaptado).

A configuração do ar condicionado foi ajustada para manter uma temperatura de conforto de 23 a 25°C no interior da casa. As condições de manter esta temperatura é uma das regras do SDE. As simulações do sistema de condicionamento de ar no EnergyPlus utilizam o objeto *ZoneHVAC:PackagedTerminalHeatPump*. A temperatura do termostato é setada no objeto *ThermostatSetpoint:DualSetpoint* e os schedules da temperatura de aquecimento e resfriamento são desenvolvidos no objeto *schedule:compact*.

3.5 Sistema solar fotovoltaico

3.5.1 Geradores fotovoltaicos

O programa Energyplus disponibiliza modelos de geradores que podem ser empregados nas simulações do sistema solar fotovoltaico. O programa exige dados completos das características dos módulos fotovoltaicos e inversores, assim como detalhes da configuração dos módulos, indicando o número de módulos em série e o número de strings em paralelo.

A produção de energia é baseada na suposição que a potência elétrica é constante e contínua durante as simulações. Assim, a escolha do modelo matemático determina o cálculo da produção de energia elétrica diária. Os modelos desenvolvidos no programa são os seguintes: (1) modelo Simples, (2) modelo Equivalent One Diode e (3) modelo Sandia. No modelo simples, o usuário tem acesso direto à eficiência de conversão dos módulos fotovoltaicos e não necessita especificar as características elétricas do arranjo fotovoltaico. O modelo simples possui uma eficiência de conversão fotovoltaica constante, enquanto os outros dois modelos possuem relações empíricas que preveem com mais exatidão o desempenho operacional do sistema FV com base em condições como temperatura das células fotovoltaicas e irradiação solar incidente (GRIFFITH & ELLIS, 2004). O modelo Equivalent One Diode é um modelo empírico de quatro parâmetros que prevê o desempenho elétrico de módulos fotovoltaicos cristalinos. O modelo simula um gerador FV com um circuito equivalente que consiste de uma fonte de corrente contínua, um diodo e dois resistores pelo qual a intensidade da corrente elétrica no circuito depende da radiação solar incidente (GRIFFITH & ELLIS, 2004).

O modelo de gerador fotovoltaico Sandia é baseado em um estudo realizado pelo laboratório nacional Sandia (Sandia National Laboratory) (KING, 1996; KING et al., 2003) e a implementação do modelo no programa EnergyPlus é baseada no trabalho de Greg Barker do Laboratório Nacional de Energias Renováveis (National Renewable Energy Laboratory - NREL) (BARKER, 2003). Barker apresenta um método capaz de prever o desempenho in-situ de um arranjo fotovoltaico de 630 Wp a partir de dados experimentais diários em Golden, nos Estados Unidos. O método envolve o ajuste de curvas I x V para definir funções polinomiais que descrevem o comportamento do arranjo fotovoltaico em função da temperatura e da irradiância solar. Os coeficientes propostos foram desenvolvidos para um módulo particular, e as equações do modelo foram utilizadas para calcular cinco pontos da curva característica I x V. Dentre os parâmetros do modelo Sandia, estão as variáveis de tensão e corrente: corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente no ponto máximo de potência (Impp) e tensão no ponto máximo de potência (V_{mpp}). O modelo considera ainda a área ativa dos módulos e o número de células em série e em paralelo. Após a determinação dos coeficientes do modelo, a produção de energia esperada pelo arranjo FV pode ser modelada em uma base anual, mensal, diária ou horária. Para isso, o desempenho do modelo deve ser acoplado com um banco de dados de um ano de referência TMY (arquivo climático) contendo dados meteorológicos locais ou com medidas diretas dos parâmetros requeridos (KING et al., 2003). Assim, valores da média horária de irradiância solar e temperatura dos módulos FV são incluídos nas análises, assim como a eficiência e o nível de potência elétrica de saída do inversor FV.

Na análise do desempenho de um arranjo FV, características térmicas, elétricas e ópticas dos módulos fotovoltaicos são incluídas no modelo Sandia pelo qual são quantificadas as influências relacionadas ao ambiente externo e as variações físicas das células solares (KING et al., 2003). O modelo foi validado para módulos fotovoltaicos planos e as aplicações incluem o projeto e dimensionamento de sistemas, a otimização do desempenho de sistemas FV e a comparação em tempo real de dados medidos e simulados.

O modelo Sandia possui uma biblioteca de dados que pode ser obtido pela base de dados da *Maui Solar Energy Software Corporation*. Este modelo é mais complexo que os outros dois modelos, pois sua biblioteca possui diferentes recursos quando comparados aos outros modelos. Por esta razão, o modelo Sandia será empregado neste trabalho no desenvolvimento das simulações dos geradores fotovoltaicos. Os parâmetros de entrada do modelo Sandia no EnergyPlus, obtidos no banco de dados da Maui Corporation, podem ser verificados pela Figura 44.

O programa também é capaz de comparar o consumo momentâneo das cargas elétricas com a produção fotovoltaica associando o sistema solar fotovoltaico com a demanda de energia elétrica da casa. Para isto, utiliza-se a classe de objetos *Electric Load Center: Distribution.* Nesta classe de objeto, adicionam-se geradores locais que são empregados para reduzir a demanda de eletricidade das cargas elétricas incluídas nas simulações. Através da comparação entre a geração e consumo de eletricidade, o programa calcula a energia elétrica importada da rede elétrica e a energia elétrica excedente. Neste objeto, o tipo de operação do gerador utilizado foi o *Track Electrical.* Este tipo de operação realiza um rastreamento da geração e do consumo de eletricidade para que nos momentos de geração solar a energia seja injetada na carga. Todavia, importa-se energia da rede elétrica quando a geração não é suficiente para abastecer a carga. Por outro lado, exporta-se energia para a rede elétrica quando a geração é maior que o consumo da carga.

Em aplicações de simulações energéticas em edificações, a radiação solar deve ser calculada sob a superfície inclinada dos geradores fotovoltaicos. Estes cálculos são dirigidos pela entrada de dados de irradiação solar utilizando modelos de cálculo para céu claro com fator de correção apropriado. Enquanto a irradiação global horizontal é sempre virtualmente medida, as

medidas da irradiação direta normal e da irradiação difusa horizontal adicionam um grau maior de precisão nos resultados (LOUTZENHISER et al., 2007). Por fim, a geração solar fotovoltaica anual será simulada para Madri com uma inclinação ideal dos módulos de 15º e desvio azimutal do norte de 180º. Não será considerado nas simulações nenhum tipo de sombreamento que possa interferir na operação dos módulos fotovoltaicos.

IDU01 PhotovoliaicPerformance:Sandia (0002) ElectricLoadCenter.Generators (0002) ElectricLoadCenter.twetert_cokUpTable (0002) ElectricLoadCenter.twetert_cokUpTable (0002) ElectricLoadCenter.twetert_cokUpTable (0002) Curve:Quadratic (0002) Curve:Cubic (0004) Curve:Biquadratic	E	D: N2 Default: 1 Range: 1 <=X but no ma:
Field	Units	Obj1
Name		SunPower SPR 230
Active Area	m2	1.244
Number of Cells in Series	dimensionless	72 •
Number of Cells in Parallel	dimensionless	1
Short Circuit Current	A	5.99
Open Circuit Voltage	V	48.7
Current at Maximum Power Point	A	5.61
Voltage at Maximum Power Point	V	41
Sandia Database Parameter alsc	1/K	0.00058
Sandia Database Parameter almp	1/K	-0.00038
Sandia Database Parameter c0	dimensionless	1.0072
Sandia Database Parameter c1	dimensionless	-0.0072
Sandia Database Parameter BVoc0	V/K	-0.133
Sandia Database Parameter mBVoc	V/K	0
Sandia Database Parameter BVmp0	V/K	-0.14
Sandia Database Parameter mBVmp	V/K	0
Diode Factor	dimensionless	1.241
Sandia Database Parameter c2	dimensionless	0.323035
Sandia Database Parameter c3	dimensionless	-3.49839
Sandia Database Parameter a0	dimensionless	0.9259
Sandia Database Parameter a1	dimensionless	0.07365

Figura 44. Parâmetros do modelo de gerador fotovoltaico Sandia no EnergyPlus.

3.5.2 Inversores

Assim como nos geradores fotovoltaicos, o EnergyPlus possui três modelos de inversores: (1) modelo Simples, (2) Modelo *Function of Power*, (3) Modelo *Look Up Table*. O modelo simples utiliza uma eficiência de conversão c.c.-c.a. constante. A eficiência de conversão do modelo Function of Power é função da potência normalizada. Por sua vez, a eficiência do modelo Look Up Table é calculada usando uma interpolação linear. Para ambos os modelos, Function of Power e Look Up Table, a produção de potência é normalizada pela potência de entrada no inversor em c.c. (Energyplus Input-Output Reference, 2012). O modelo Look Up Table considera como variáveis de entrada a potência consumida em *standby*, a máxima potência de saída em corrente alternada, a tensão nominal em corrente contínua e a eficiência dos inversores de 10 a 100% da potência e tensão nominal de operação. Em virtude da complexidade dos modelos, este trabalho irá utilizar o modelo de inversor Look Up Table. Os

parâmetros de entrada do modelo Look Up Table no EnergyPlus podem ser observados na Figura 45.

[] ElectricLoadCenter:Storage:Simple [] ElectricLoadCenter:Transformer [0002] ElectricLoadCenter:Distribution		No default value avai Range: 0 <= X <= 1	ilable
Field	Units	Obi1	Obj2
Name		Inversor Sub_1	Inversor Sub_2
Availability Schedule Name		Always On	Always On
Zone Name		Zona 01 interna	Zona 01 interna
Radiative Fraction		0.3	0.3
Rated Maximum Continuous Output Power	W	5000	5000
Night Tare Loss Power	W	0.25	0.25
Nominal Voltage Input	V	270	270
Efficiency at 10% Power and Nominal Voltage		0.869	0.869
Efficiency at 20% Power and Nominal Voltage		0.919	0.919
Efficiency at 30% Power and Nominal Voltage		0.939	0.939
Efficiency at 50% Power and Nominal Voltage		0.954	0.954
Efficiency at 75% Power and Nominal Voltage		0.957	0.957
Efficiency at 100% Power and Nominal Voltage		0.961	0.961

Figura 45. Parâmetros do modelo de inversor Look Up Table no EnergyPlus.

3.6 Variáveis de saída no EnergyPlus

Neste trabalho, as variáveis de saída no EnergyPlus são apresentadas diariamente, com intervalo de simulação programado, apresentando resultados de distribuição de energia elétrica diária ou anual. As validações das simulações diárias foram realizadas comparando-as com dados medidos durante a operação da casa no Solar Decathlon. Por sua vez, as simulações anuais foram realizadas para análise sazonal de operação do sistema elétrico da casa com o intuito de classificar a edificação nos termos de balanço neto de energia (EEN, EEZ ou EEP), sendo determinado pela distribuição de energia elétrica anual. As variáveis de saída do programa são reportadas no objeto de saída Output Variable e podem apresentar resultados em intervalos de 5 ou 15 minutos (timestep), horários, diários ou mensais. As variáveis de distribuição de energia elétrica utilizadas neste estudo são: energia elétrica consumida pela edificação (E_{c,i}), energia elétrica importada da rede elétrica (E_{imp,i}), energia elétrica produzida em c.a. pelo sistema solar fotovoltaico (E_{-ca.i}), energia elétrica produzida pelo sistema solar fotovoltaico e consumida pela casa (E_{-ca,c,i}), energia elétrica produzida pelo sistema solar FV e exportada para a rede elétrica (E_{exp.i}), perdas de energia elétrica nos inversores (E_{p,inv,i}) e potência elétrica produzida em c.a. (P-ca.i). O índice i especifica o intervalo de simulação das variáveis de saída do programa. A energia com índice d ao invés de i indica uma distribuição de energia diária, já que os montantes de energia obtidos diariamente correspondem à soma dos intervalos de medição. Os montantes de energia com índice an são indicados para uma distribuição de energia anual.

As variáveis climáticas de saída do programa são: temperatura do módulo fotovoltaico ($T_{mod,i}$) e irradiância na superfície inclinada ($G_{tot,i}$). A irradiação na superfície inclinada $H_{tot,i}$ é obtida com a integração de $G_{tot,i}$ ao longo do tempo.

3.7 Operação do sistema de energia elétrica da edificação

3.7.1 Energia elétrica diária consumida pela edificação

A edificação pode consumir eletricidade de duas fontes diferentes: do arranjo fotovoltaico ou da rede elétrica:

$$E_{c,d} = E_{-ca,c,d} + E_{imp,d}$$
 (17)

No qual, $E_{-ca,c,d}$ é a energia elétrica diária produzida pelo sistema solar FV e consumida diretamente pela carga, e $E_{imp,d}$ é a energia elétrica diária importada da rede elétrica pelo qual é consumida pela casa.

Com os geradores fotovoltaicos produzindo potência elétrica suficiente para abastecer a demanda instantânea da casa, não há importação de energia da rede elétrica, ou seja, o sistema solar fotovoltaico exporta a energia excedente para a rede. Neste caso, a rede elétrica se comporta como um elemento de estoque para o sistema. Já no caso da energia elétrica dos geradores não ser suficiente para suprir a energia elétrica da carga, existe neste caso, importação de energia da rede elétrica. Durante a noite, a geração solar é nula, portanto a energia elétrica importada da rede é igual à energia consumida ($E_{imp,d} = E_{c,d}$).

3.7.2 Energia elétrica diária produzida pelo sistema solar

fotovoltaico

A energia elétrica diária produzida em c.a. pelo sistema solar FV é designada como $E_{-ca,d}$. Em aplicações práticas, $E_{-ca,d}$ pode ser calculada como:

$$E_{-ca,d} = E_{-ca,c,d} + E_{exp,d} (18)$$

Pelo qual, $E_{exp,d}$ é a energia elétrica que não é utilizada pela edificação e que é exportada para a rede elétrica. De fato, conforme determinaram Bojić et al. (2011), $E_{exp,d}$ pode ser decomposto em dois tipos de energia não diretamente aproveitados pela carga:

$$E_{exp,d} = E_{comp,d} + E_{exc,d}$$
(19)

 $E_{comp,d}$ é a energia elétrica diária injetada na rede elétrica que compensa a energia elétrica importada da rede quando o sistema solar FV não está disponível e $E_{exc,d}$ é a energia elétrica diária excedente produzida pelo sistema solar FV. Portanto, a energia elétrica total produzida pelo sistema solar fotovoltaico será:

$$E_{-ca,d} = E_{-ca,c,d} + E_{comp,d} + E_{exc,d}$$
(20)

Sendo a energia elétrica consumida diária E_{-c,d}:

$$E_{-c,d} = E_{-ca,d} - E_{exc,d}$$
 (21)

Pode-se determinar E_{comp,d} como:

$$\mathsf{E}_{\mathsf{comp},\mathsf{d}} = \mathsf{E}_{\mathsf{-c},\mathsf{d}} - \mathsf{E}_{\mathsf{-ca},\mathsf{c},\mathsf{d}} \quad (22)$$

Conforme as definições de Bojić et al. (2011), quando $E_{exp,an} < E_{imp,an}$; $E_{exc,an} = 0$, a edificação é classificada a energia negativa (EEN). Quando $E_{exp,na} = E_{imp,na}$; $E_{exc,an} = 0$, a edificação é a energia zero (EEZ). E finalmente, quando $E_{exp,an} > E_{imp,na}$; $E_{exc,an} > 0$, a edificação é a energia positiva (EEP).

Além dos diferentes tipos de energia elétrica compostos pelo sistema solar FV, neste trabalho a produtividade final e a taxa de desempenho global são dois parâmetros do sistema solar que serão examinados durante a operação do sistema. Estes parâmetros são de extrema importância para caracterizar a operação de um sistema em uma determinada localidade, já que podem indicar o efeito das perdas de potência de saída devido ao efeito da temperatura, utilização incompleta da radiação solar e ineficiência ou falha dos componentes do sistema (REICH et al., 2012).

3.8 Avaliação do desempenho de energia elétrica de edificações do

Solar Decathlon

Uma das principais vantagens da geração solar distribuída é que a eletricidade é consumida no mesmo local onde é gerada. Isto reduz a necessidade de linhas de transmissão e minimiza as perdas no transporte de eletricidade. Este efeito é maximizado se a eletricidade é consumida ao mesmo tempo em que é gerada (SDE, 2012). A organização do Solar Decathlon realizou a coleta de dados de geração e consumo de eletricidade em todas as edificações envolvidas na competição. As avaliações deste contexto incluem o perfil de correlação temporal entre geração-consumo. O critério de avaliação da correlação temporal entre geração e consumo de eletricidade é decidido pelo índice de correlação temporal (ξ) através da seguinte expressão:

$$\xi = \frac{E_{-ca,c}}{E_c}$$
(23)

Com o intuito de medir e comparar os parâmetros de geração de energia elétrica entre edificações do Solar Decathlon foram comparados o desempenho de cinco casas conforme Tabela 9. A tabela mostra as principais características dos sistemas de geração de energia elétrica com sistema solar fotovoltaico e indica também a estimativa de produção de eletricidade anual determinado pelas equipes através de simulações computacionais.

Além da produção de energia elétrica, um dos objetivos é de comparar a produtividade fotovoltaica entre as casas. Com a produtividade final é possível comparar diferentes sistemas, mesmo estes apresentando uma quantidade diferente de geradores fotovoltaicos, pois este parâmetro normaliza a produção de energia em relação à potência nominal dos geradores. Um panorama geral da Vila Solar em Madri é mostrado pela Figura 46 indicando as edificações analisadas neste trabalho.

Nome da casa	País de origem	Potência elétrica instalada (kW _p)	Tecnologia dos módulos FV	Inclinação dos painéis FVs (º)	Tipo de inversor; capacidade (kW)	Estimativa de produção eletricidade (kWh/ano)	Prod. Final anual (Y _F) (kWh/kW _p)
Ekó	Brasil	11,04	m-Si	15	Sunny Mini- Central; 5	18.800	1.703
Canopea	França	10,7	p-Si	5	Sunezy 600E; 4,6	12.733	1.190
Patio 2.12	Espanha	11,3	m-Si	10	Sunny Boy; 5	16.378	1.449
Omotenashi	Japão	11,35	a-Si	21,8	Aurora; 5	13.374	1.178
Counter Entropy	Alemanha	6,75	a-Si	10	SMA; 6,75	8.886	1.316

Tabela 9. Características dos sistemas de geração de eletricidade.



Figura 46. Vista geral da Vila Solar. Localização: Madri, Espanha. Orientação dos geradores fotovoltaicos: 9: 180°.

3.9 Operação do sistema de energia – análise econômica

3.9.1 Estimativa do custo do investimento

Os sistemas solares FV envolvem tecnologias recentes que vêm sofrendo alterações nos preços, sendo que estes sistemas envolvem financiamentos com valores elevados. Assim, este estudo pretende determinar os custos do sistema solar FV verificando as vantagens da aplicação do sistema na edificação.

O custo de investimento em sistemas fotovoltaicos é composto de três itens principais: (1) módulos fotovoltaicos, (2) inversores e (3) "*Balance of the System* – BoS ³". Os preços dos módulos vêm caindo ano a ano, e considerando o cenário do mercado internacional e a crise econômica europeia, estas reduções têm sofrido variações significativas. Conforme publicação da PHOTON International de dezembro de 2012, o preço do módulo FV de origem asiática vendido na Alemanha no mês de novembro de 2012 girou em torno de 0,4 a 0,9 €/Watt com uma redução no preço de 32,6% nos últimos doze meses em relação ao início de novembro de 2011.

O custo total do sistema da casa Ekó (C_{total}) pode ser representado pelo custo do investimento dos seguintes elementos: painéis fotovoltaicos ($C_{painéis_FV}$), inversores fotovoltaicos ($C_{inversores}$) e BoS (C_{BoS}). C_{BoS} representa o custo de investimento: sistema de aquisição de dados ($C_{sistema_aquisição_dados$), instalação e manutenção ($C_{instalação_manutenção}$) e componentes elétricos de proteção e

³ BoS engloba os componentes elétricos de proteção e controle, as estruturas mecânicas de sustentação, cabos e conexões, assim como custos gerais de instalação e manutenção.

controle, estruturas mecânicas de sustentação, condutores elétricos e conexões (C_{materiais_elétricos}):

C_{total} = C_{painéis_FV} + C_{inversores} + C_{sistema_aquisição_dados} + C_{instalação_manutenção} + C_{materiais_elétricos} (24)

3.9.2 Fator de capacidade e custo de produção

O fator de capacidade (FC) pode ser definido como o aproveitamento efetivo da energia produzida pelo sistema fotovoltaico. É um valor adimensional, entre zero e um, no qual a unidade corresponde à produtividade máxima possível do sistema. O fator de capacidade depende tanto da irradiação solar (recurso primário) como do fator de desempenho (*performance ratio*) e sua principal função é medir a qualidade da instalação fotovoltaica (ABINEE, 2012). O Fator de capacidade é calculado em função da energia gerada total anual do sistema solar fotovoltaico, conforme a equação:

$$FC(\%) = \frac{E_{-ca,an}}{P_I \cdot 24 \cdot 365} \cdot 100$$

(25)

Onde P_I corresponde à potência instalada do sistema solar fotovoltaico.

O custo de produção da energia fotovoltaica (R\$/kWh) - *Levelized Cost Of Electricity* (LCOE) é um dos fatores mais importantes no momento de investir no sistema. Um método comum para analisá-lo é comparando-o com a tarifa de eletricidade da rede elétrica. Esta comparação é particularmente interessante para os sistemas fotovoltaicos, porque os consumidores finais de energia elétrica pagam a tarifa integral, o qual incluem impostos que o tornam mais próximo do custo da energia FV. A concepção principal deste método é verificar se a tarifa de energia elétrica é mais cara do que o custo anual de energia fotovoltaica, caso em que seria apropriado para investir. O custo de produção (CP) em R\$/kWh pode ser calculado pela expressão:

$$CP = II \times (FRC + 0\&M) \times \left(FRC \times \sum_{k=1}^{n} \frac{E_k}{(1+i)^k}\right)^{-1}$$
(26)

As variáveis para o cálculo de CP são as seguintes:

II: investimento inicial (R\$).

FRC: Fator de Retorno do Capital.

O&M: custo de Operação e Manutenção anual sobre o custo de investimento do sistema FV (%).

 E_k : energia anual produzida no ano *k* (kWh).

n: vida útil do sistema.

i: taxa anual de juros.

4. Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados relacionados às medições do sistema solar fotovoltaico e do consumo de eletricidade da casa e as comparações do desempenho energético com as simulações no programa EnergyPlus. Em primeiro lugar são apresentados os resultados experimentais do perfil de consumo de energia elétrica da edificação e das medições de radiação solar e de geração de energia elétrica. Os procedimentos experimentais determinam os resultados medidos pelo sistema de aquisição de dados do sistema solar fotovoltaico. No nível de consumo de eletricidade da edificação, os resultados experimentais foram adquiridos pelo sistema de medição da organização do SDE. Os resultados foram organizados conforme as medições realizadas no período da competição, do dia 17 de setembro de 2012 até o dia 26 de setembro de 2012.

Em seguida, verificou-se o balanço de energia elétrica conforme determinado pela demanda de energia elétrica da edificação e pela geração solar fotovoltaica diária nas condições climáticas de Madri. A seguir verificou-se os resultados as simulações no EnergyPlus para verificação da compatibilidade com os dados de operação da casa durante o SDE.

Em outro contexto, foram analisados cenários de geração e produtividade fotovoltaica entre edificações do SDE e a correlação temporal entre geração e consumo de eletricidade.

As simulações anuais determinam a operação da casa conforme a sazonalidade e permitem estudar com mais detalhes o comportamento energético da edificação. Determinando o balanço energético anual é possível caracterizar a edificação com maior exatidão e apresentar uma metodologia de cálculo baseada em propostas de edifícios eco-eficientes com balanço anual neto negativo, zero ou positivo.

4.1 Resultados experimentais

4.1.1 Consumo de energia elétrica total da edificação

Durante o Solar Decathlon, a energia elétrica consumida pela casa Ekó apresentou comportamentos diferentes conforme as atividades desempenhadas na competição. Houve a necessidade de alguns reparos na casa após o início das atividades, por isso o perfil de consumo apresentou variações em relação aos dias de atividades programadas. As Figuras 47 e 48 mostram a demanda horária de potência elétrica e o perfil horário integrado de consumo de energia elétrica, respectivamente, para os dias 20 e 21 de setembro. A demanda da casa é representada por tarefas diárias domésticas,

como lavar roupas, cozinhar e trabalhar assim como para demonstração da casa ao público visitante.

Através da Figura 47, observa-se no dia 20/09, entre 8h30min e 10h da manhã e entre 16h30min e 17h15min da tarde, a demanda de energia elétrica eleva-se consideravelmente, atingindo um pico de aproximadamente 4 kW. Conforme indicado na figura, os horários com demanda mais elevada são determinados pelo funcionamento do sistema de condicionamento de ar, durante alguns períodos da manhã e pela tarde, e pelo forno elétrico durante a atividade de cooking no final da tarde. Também foi observada a utilização da máquina de lavar louças e da máquina de lavar roupas pela manhã. Os perfis horários de demanda dos equipamentos elétricos indicados na figura podem também corresponder a cargas adicionais sendo utilizada ao mesmo tempo, como a iluminação interna por exemplo. No período de almoço e durante a noite a demanda é estável, sendo que nestas circunstâncias, o consumo de energia pode ser determinado pelas seguintes cargas elétricas: refrigerador/freezer, computador e iluminação (interna ou externa). O dia 20/09 apresentou o maior valor de consumo de eletricidade da edificação durante 0 SDE $(E_{c,d} = 25,08 \text{ kWh})$. Este perfil de consumo é muito alto levando em consideração a área da edificação. Comparando com o consumo de uma residência de 95 m², localizada em São Paulo, percebe-se uma diferença de 13,65 kWh/dia (energia consumida pela casa Ekó 37% superior). Conforme pode ser observado pela Figura 48, o consumo deste período é muito maior que o dia 21/09 em alguns períodos do dia devido à utilização de cargas mais importantes, como o sistema de condicionamento de ar, conforme ocorre entre as 17h e 18 h ($E_c = 3,458$ kWh). O perfil de demanda do dia 21/09 $(E_{cd} = 14.65 \text{ kWh})$ apresenta picos de potência de 1.8 kW a 2.4 kW, entre as 8h e 11h da manhã, e mantém-se com poucas variações, apresentando, porém, algumas elevações no final da tarde. Este perfil de demanda apresenta uma melhor aproximação quando comparado àquela edificação residencial de 95 m² que apresenta uma média mensal de 11,5 kWh. A diferença entre o consumo total diário entre os dias 20 e 21 de setembro é de 10,4 kWh.



Figura 47. Demanda de potência elétrica diária da casa Ekó, representando o perfil de consumo de um casal. Intervalo de medição: 15 min.



Figura 48. Perfil horário de consumo de energia elétrica da casa Ekó.

Nos finais de semana do Solar Decathlon, as atividades domésticas são alteradas e não seguem o cronograma determinado durante a semana. As Figuras 49 e 50 mostram a demanda horária de potência elétrica e o perfil horário integrado de consumo de energia elétrica, respectivamente, para o sábado e domingo (22 e 23 de setembro). No dia 22 de setembro, a demanda de energia elétrica permanece sem variações significativas até por volta das 16h15min. A partir deste horário, a demanda começa a aumentar, atingindo um
pico de 1,35 kW às 16h30min. A partir das 17h30min o consumo decresce e estabiliza-se por volta das 21h. Como no caso do perfil de consumo semanal, o consumo de eletricidade no final de semana apresenta períodos durante o dia com consumo estável que não diferem dos períodos noturnos, sendo que, pode ser igualmente determinado pelo consumo do refrigerador/freezer, computador e iluminação. É importante salientar que as cargas elétricas de potência elétrica mais elevada não são utilizadas nos sábados e domingos, conforme indicam as regras da competição. Os horários com demanda mais elevada, como no caso da potência de pico 1,35 kW pode corresponder à utilização de cargas com baixa potência, como a bomba hidráulica ($P_n = 720 \text{ W}$) funcionando juntamente com outras cargas. O perfil de demanda do dia 23/09 é regularmente estável, com algumas variações entre 12h45min e 15h45min, variando de uma média diária de 0,06 kWh para 0,1 kWh. Como pode ser observado pela Figura 50, o consumo do dia 22/09 pode chegar próximo de 0,9 kWh sendo que no dia 23/09 o pico de consumo não ultrapassa 0,5 kWh. A diferença entre o consumo total diário do dia 22/09 e 23/09 é de 3,42 kWh. O dia 23 apresentou o menor consumo durante a competição ($E_{c,d} = 6,40$ kWh).



Figura 49. Demanda de potência elétrica diária da casa Ekó no final de semana. Intervalo de medição: 15 min.



Figura 50. Perfil horário de consumo de energia elétrica da casa Ekó durante o final de semana.

4.1.2 Radiação solar no plano inclinado e geração solar fotovoltaica

Os resultados experimentais da radiação solar incidente no plano inclinado dos geradores fotovoltaicos e da geração de energia elétrica foram investigados. A radiação total incidente sobre uma superfície inclinada inclui as componentes direta e difusa e mais uma parcela devido à radiação refletida pelo solo ou outros edifícios ao redor que é função do albedo local. Analisando a radiação solar total integrada por um intervalo de medição de 15 minutos, que é igual à irradiação solar total incidente no plano dos geradores fotovoltaicos (H_{tot}, kWh/m²) observou-se uma média de irradiação de 0,1 kWh/m² durante o período de 17 a 26 de setembro. A irradiação solar do dia 19 de setembro é a mais elevada dentre todos os dias analisados conforme indicado pela Figura 51. Observou-se que a irradiação solar do dia 21 de setembro é 11,25% maior que o dia anterior, causado, sobretudo, pelas condições climáticas, principalmente por obstruções de nuvens.



Figura 51. Média diária da irradiação solar total H_{tot,d} incidente no plano dos geradores fotovoltaicos.

A Figura 52 apresenta o comportamento horário da radiação solar (irradiância solar, G_{tot}), obtidos pela célula de referência de dois dias típicos de verão em Madri. A curva em vermelho mostra um dia com nebulosidade. Entre 14h30min e 15h, o nível de irradiância decresce de 875 W/m² para 228 W/m². Em seguida, às 15h30min, a irradiância retorna para 800 W/m² e continua a oscilar até o pôr do Sol. É importante salientar que conforme o horário de verão de Madri, os valores de pico diário de irradiância solar ocorrem por volta das 14 horas, no momento em que os raios solares começam a incidir paralelamente à superfície dos geradores FV. A curva em laranja mostra um dia típico de céu claro, com algumas obstruções causadas por nuvens entre as 15h15min e 16h.



Figura 52. Irradiância solar no plano inclinado em Madri, Espanha. Célula de referência: Sunny Sensor Box (a-Si). Inclinação: 15º. Orientação: 180º S. Intervalo de medição: 15 min.

A curva de irradiância solar em função das curvas de potência elétrica produzida em corrente contínua e em corrente alternada no dia 19 de setembro é dada pela Figura 53. Em dia completo de céu claro, a curva de geração solar fotovoltaica é quase uma senóide perfeita e pode ser observado que a irradiância solar incidente na superfície dos módulos fotovoltaicos não é obstruída por nuvens ou nebulosidade. Por sua vez, a Figura 54 mostra a curva de irradiação solar integrada horária para o dia 19 de setembro em função da geração de energia elétrica integrada a cada hora em corrente contínua e em corrente alternada. A irradiação solar total diária neste período é de 6,10 kWh/m², atingindo um pico superior a 0,8 kWh/m². Por sua vez, a energia elétrica total produzida em corrente contínua E-cc.d é de 61,15 kWh e em corrente alternada E-ac,d de 58,4 kWh, distribuídas entre os dois inversores de mesma capacidade. Durante o pico de radiação solar, entre 14h e 15h, a energia produzida em c.c. é de 8,6 kWh. Observando a Figuras 53, é fácil perceber que no dia 19 de setembro não ocorreram falhas ou interrupções no sistema solar fotovoltaico porque a curva de produção de energia segue a trajetória da curva de irradiância solar durante o percurso solar. A diferença entre a geração de energia em c.c. e em c.a. deve-se às perdas de energia por dissipação de calor nos inversores correspondendo neste caso a 2,75 kWh.



Figura 53. Potência elétrica produzida em função da irradiância solar no plano inclinado. Data de medição: 19 de setembro de 2012. Datalogger: Sunny Web Box. Intervalo de medição: 15 min.



Figura 54. Perfil horário de energia elétrica produzida em função da irradiação solar no plano inclinado. Data de medição: 19 de setembro de 2012. Datalogger: Sunny Web Box.

Foi determinada a potência nominal de saída em c.c. do arranjo fotovoltaico através do diagrama P_{-cc} x G_{tot} (Figura 55) nas condições de operação. No diagrama, o coeficiente linear da reta azul nas condições de operação é de 10,165 m², o que, multiplicado pela irradiância nas condições padrão de teste 113

 (1.000 W/m^2) resulta em uma potência de 10,165 kW. A reta vermelha mostra a curva P_{-cc} x G_{tot} nas condições padrão de teste com potência nominal de placa de 11,04 kW. O valor da potência de saída em c.c., obtido no sistema em operação, é 8 % menor em relação à potência nominal de placa. Todavia, as aproximações dos valores com o coeficiente linear da reta R² indicam que o gerador fotovoltaico opera em perfeitas condições com sua capacidade de produção dentro do nível esperado.



Figura 55. Potência em c.c. P_{-cc} em função da irradiância solar G_{tot} utilizado para determinar a potência nominal de operação do arranjo fotovoltaico. Data de medição: 19 de setembro. Reta vermelha: Condições Padrão de Teste (CPT); Reta azul: Condições de Operação.

A capacidade máxima de geração solar fotovoltaica da casa foi investigada durante o Solar Decathlon. Verificou-se que o dia 24 de setembro apresentou o maior índice de produção, no qual a energia elétrica total em corrente contínua E-cc.d foi de 64,92 kWh. A 13h30min, o sistema atingiu uma potência de pico em c.c. de 9,93 kW_p, conforme pode ser observado pela Figura 56, correspondendo a 90 % da capacidade instalada do sistema. Neste mesmo período, comparando a produção E-cc,d com E-ca,d, verificou-se 2,33 % de perdas de energia dissipada na forma de calor pelo processo de conversão c.c. - c.a. O dia com maior capacidade de produção é 23,25 % superior ao dia de menor capacidade (dia 17 de setembro). A diferença de irradiação solar total nos dois dias é de 20 %. Conforme indicado pela Figura 56, no dia 26 de sistema atingiu uma potência setembro 0 elétrica de 10,52 kW_p, correspondendo a 95 % da capacidade instalada do sistema. De toda forma, em virtude das regras impostas pela competição, se o sistema operar com sua capacidade máxima durante os horários de pico de radiação solar, os inversores foram programados para limitar a potência total de saída P_{-ca} em 10 kW, caso os valores de potência ultrapassem este valor.

A vida útil dos módulos de m-Si instalados no Brasil é de 20 a 30 anos sendo que a tendência da potência elétrica de saída é decrescer ao longo do tempo acompanhado pela sua depreciação. Para um módulo FV encapsulado com EVA, as perdas de potência de saída variam entre 1 % e 2,5 % ao ano (CZANDERNA & PERN, 1996). A vida útil do módulo sofre influência principal da degradação das células solares causada pela exposição aos raios ultravioletas, chuva, umidade, corrosão ou gases atmosféricos e poluentes. Desta forma, a capacidade de produção do sistema mostrada na figura 56 deve diminuir ao longo dos anos de utilização, dependendo da conservação dos elementos da tecnologia FV, tais como das lâminas de silício cristalino, dos encapsulantes das células e do módulo, da camada antirreflexo das células e dos contatos metálicos. Estes materiais são empregados não apenas para exercer funções específicas do dispositivo como também para provisionar proteção ao meio ambiente, que é crucial para uma longa vida útil, auxiliando na redução dos custos de ciclo de vida do produto e aumentando o valor de mercado do dispositivo.



Figura 56. Capacidade de produção de potência elétrica em corrente contínua (P_{-cc}) de 22 a 26 de setembro no Solar Decathlon.

4.1.3 Produtividade final e taxa de desempenho global

Como a produtividade final (Y_F) e a taxa de desempenho global (PR) sofrem grande influência da radiação solar local e da temperatura, foram analisadas variações horárias da produtividade fotovoltaica e de PR em função da irradiação solar. Figuras 57 e 58 apresentam, respectivamente, a produtividade final e a taxa de desempenho global em função dos níveis irradiação solar horária (H_{tot.d}) entre os dias 17 e 26 de setembro. A produtividade final mostra um aumento linear com o aumento de H_{tot,d} devido a forte dependência da energia produzida E_{-ca} pela irradiação solar. Já a taxa de desempenho global (PR) possui uma leve tendência a crescer nos níveis intermediários de irradiação (com valores horários de H_{tot} entre 0,05 e 0,1 kWh/m²) já que estes correspondem aos níveis mais amenos de temperatura do módulo T_{mod}. Desta maneira, T_{mod} exercendo influência significativa na eficiência dos geradores, os valores de PR tendem a aumentar com a redução de T_{mod}. Também é possível notar que a dispersão de PR é menor com valores mais elevados de irradiância. Nesta faixa de valores de irradiação solar T_{mod} torna-se mais elevado fazendo com que a eficiência dos geradores e consequentemente o PR sejam reduzidos. A Figura 58 mostra também que o melhor desempenho de PR nas condições climáticas de Madri para o período é acima de 94 % o que é de se esperar de uma região com grande capacidade de geração solar fotovoltaica devido aos altos níveis de irradiação solar.



Figura 57. Produtividade final diária em função da irradiação solar entre 17 e 26 de setembro.



Figura 58. Taxa de desempenho diária em função da irradiação solar entre 17 e 26 de setembro.

O comportamento da produtividade fotovoltaica e da taxa de desempenho diária durante o SDE é apresentada pela Figura 59. A produtividade tem influência significativa do recurso solar diário da região e sua média durante o período analisado é de 4,43 kWh/kW_p. O desempenho global (PR) mostra o efeito total de perdas e falhas no sistema, que é bastante influenciado pelas variações de temperatura e pela irradiância solar. O desempenho global (PR) da casa Ekó é otimizado pela utilização de módulos fotovoltaicos de alta eficiência (18,5 %) já que PR é diretamente proporcional à eficiência relativa (η_{rel}) do gerador FV conforme indicado pela Equação 10 da página 44. A média do desempenho global no SDE foi de 89 %.

Conforme pode ser observado pela Figura 59, o dia 24 de setembro apresenta a maior produtividade durante o período analisado assim como o segundo maior PR (94,8 %). Nesta data foi observado que a média da velocidade do vento local foi de 1,66 m/s e a média da irradiância solar foi de 252 W/m². Comparando o desempenho do sistema solar FV com o dia 22 de setembro nota-se que no dia 24 Y_F é 0,5 kWh/kW_p superior assim como PR é 6,25 % superior. No dia 22 a média da irradiância solar foi de 238 W/m² e por isso a produtividade neste período é alta. Porém, neste mesmo período, a média da velocidade do vento foi 46 % inferior ao dia 24 implicando em menos perda de calor por convecção causada pelo vento nos módulos fotovoltaicos e assim a elevação da temperatura dos módulos pode ter contribuído para a inferioridade de PR.



Figura 59. Produtividade e Desempenho global do sistema solar fotovoltaico da casa Ekó durante o Solar Decathlon.

4.1.4 Influência da temperatura no gerador fotovoltaico

Foi analisado o efeito do coeficiente de temperatura (β_{ref}) sobre a eficiência do gerador FV de silício monocristalino conforme Figura 60. A correlação de eficiência do gerador $\eta_{\rm G}/\eta_{\rm T_{ref}}$ é chamado coeficiente de Evans-Floschuetz e é plotado em função da temperatura de operação do gerador. A eficiência do gerador FV η_{G} é calculada pela Equação 7 - página 40. Os pontos em azul da figura são plotados a uma temperatura de referência T_{ref} de 25ºC e os pontos em vermelho para um T_{ref} de 28ºC. Os valores de $\eta_{T_{ref}}$ e β_{ref} são fornecidos por Skoplaki e Palyvos (2009) para módulos de m-Si. Através da Figura é possível perceber uma diminuição da eficiência do gerador com o aumento da temperatura de operação (T_{mod}) devido às perdas no processo de conversão de energia influenciado pelas propriedades térmicas dos materiais, notadamente devido à influência do coeficiente de temperatura β_{ref} do gerador FV. Os coeficientes de temperatura desempenham um importante papel no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos no qual exercem influência na condição de operação do pior caso do arranjo FV. O sistema FV é mais fortemente afetado pelo coeficiente de temperatura de eficiência de conversão quando a temperatura do módulo torna-se mais elevada. O aumento da temperatura implica também na redução da potência de saída do módulo FV, da tensão Voc e da corrente Isc. Nos módulos SunPower SPR 230 utilizados na casa Ekó, a potência de saída pode ser reduzida em 0,38 %/°C e a tensão Voc pode diminuir 132,5 mV/°C. Nishioka et al. (2003) determinaram um aumento de aproximadamente 1 % na potência acumulada anual de saída de um sistema fotovoltaico instalado no *The Nara Institute of Science and Technology* (NAIST), Japão, com o aperfeiçoamento de 0,1 %/°C no coeficiente de temperatura de módulos de c-Si. Desta forma, conforme indicam os autores, é necessário considerar o coeficiente de temperatura a fim de desenvolver células solares e módulos FV de alta eficiência.

A Figura 61 mostra a temperatura diária do gerador fotovoltaico sobre a eficiência do gerador FV, calculada pela Equação 7, a uma temperatura de referência de 25°C, em que $\eta_{T_{ref}}$ = 0,15 e β_{ref} = 0,0041, conforme Skoplaki e Palyvos (2009). É possível perceber que o aumento da temperatura de operação dos módulos exerce influência significativa na eficiência dos geradores. Observa-se que a eficiência do gerador FV decresce nos intervalos em que a temperatura do módulo aumenta. A temperatura ambiente é plotada para efeito de comparação com a temperatura dos módulos FV. A diferença entre a média da temperatura ambiente e a média da temperatura dos módulos é de quase 20°C. Os módulos podem atingir uma temperatura máxima de 61°C (30 % superior à temperatura máxima ambiente). A eficiência do gerador apresenta uma média de 13,60 %, com máximo de 14,65 % e mínimo de 12,75 %. Através destas análises, conclui-se que a energia elétrica de saída E_{-cc} é extremamente afetada pelas características do sistema solar FV quando a temperatura do módulo difere das condições padrão de teste e por isso a potência elétrica produzida pelo sistema não pode ser estimada somente pelas suas CPT na medida em que deve-se levar em consideração a temperatura ambiente da localidade.



Figura 60. Correlação de eficiência de Evans-Floschuetz para módulos de m-Si em função da temperatura de operação do gerador FV. Data de medição: 19 de setembro.



Figura 61. Temperatura do módulo e temperatura ambiente sobre a eficiência de conversão do gerador FV ($\eta_G = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref} (T_{mod} - T_{ref})]$). Data de medição: 19 de setembro.

4.1.5 Distribuição de energia elétrica diária

A distribuição de energia elétrica diária para diferentes tipos de energia foi analisada através de dados experimentais medidos na edificação. Durante os períodos em que a produção do sistema solar fotovoltaico é insuficiente para suprir a demanda energética da casa, o sistema elétrico foi projetado para utilizar a energia da rede elétrica local. Nestes termos, a energia elétrica é importada da rede elétrica (E_{imp}). Em outros casos, quando a radiação solar é indisponível, a demanda de eletricidade da edificação é atendida pela rede elétrica. Por outro lado, nos momentos pelo qual a produção de energia elétrica é maior que a demanda da edificação, a energia elétrica excedente é exportada para a rede elétrica (E_{exp}), contabilizando a energia excedente em créditos de energia que poderão ser utilizados nos períodos de necessidade de importação de energia da rede.

A energia elétrica é importada da rede elétrica quando $E_{-ca} < E_c$, ou seja, quando a produção não atende a demanda e pode ser calculada pela Equação 17. Por outro lado, quando $E_{-ca} > E_{consumida}$ a edificação tem excesso de energia e a energia é exportada para a rede elétrica conforme equação:

$$E_{exp} = E_{-ca} - E_c \quad (21)$$

A Figura 62 mostra o balanço entre a energia elétrica produzida e a energia elétrica consumida pela edificação durante o SDE entre os dias 17 e 21 de setembro. Os pontos positivos das curvas representam a energia excedente, indicando os períodos em que a geração solar fotovoltaica é superior à demanda. Já os pontos negativos representam a energia importada da rede elétrica, indicando, em todo caso, os períodos de produção incapaz de suprir a demanda da casa. Os pontos negativos indicam também os períodos noturnos, pelo qual a demanda energética é atendida pela rede elétrica. Os períodos de menor geração correspondem à queda da irradiação solar devido à nebulosidade ou sombreamento nos módulos ocasionados pelas características da paisagem, tais como morros que circulam o terreno. Assim, a fim de verificar a melhor posição dos módulos solares, deverá considerar-se a altitude e o percurso solar particular do local ao longo de cada dia e da estação do ano.



Figura 62. Distribuição diária do balanço de energia elétrica da edificação de 17 a 21 de setembro. Datalogger: Sunny Web Box. Intervalo de medição: 15 min.

A Figura 63 apresenta os resultados do balanço de energia elétrica com distribuição diária no dia 19 de setembro. Os resultados presentes para cada hora são: temperatura ambiente, eletricidade gerada pelo sistema FV, eletricidade total consumida pela edificação, eletricidade importada da rede elétrica e eletricidade excedente injetada na rede elétrica. Os geradores fotovoltaicos começam a produzir energia das 8h15min até por volta das 20h. Durante todo este período, a geração solar fotovoltaica abastece toda a demanda de eletricidade da casa. Através da figura, percebe-se que, fora dos períodos de geração solar fotovoltaica, a energia elétrica importada da rede corresponde à energia elétrica total consumida e durante os períodos de geração solar não existe importação de eletricidade da rede elétrica, pois a produção é suficiente para abastecer o consumo da carga. Porém, após as 19h o consumo de eletricidade da casa não corresponde ao período da curva de geração solar e neste caso a casa não aproveita a produção de energia do sistema FV. A correção da correlação entre as curvas poderia ser realizada deslocando o consumo da carga para os períodos de geração solar, como por exemplo, utilizando os equipamentos eletroeletrônicos de maior potência nominal de operação nestes períodos ou então utilizando um banco de baterias para injetar a energia na carga após os períodos de geração de energia elétrica. Todavia, grande parte da eletricidade consumida pela casa corresponde ao período de geração solar, assim, a energia elétrica produzida

pelo sistema solar pode ser utilizada diretamente pela casa. O sistema FV é capaz de cobrir a parcela de energia de resfriamento no verão durante a operação do sistema de condicionamento de ar da casa. A segunda parte da energia proveniente do sistema solar corresponde à energia elétrica excedente que não é aproveitada pela carga.

A Figura 64 apresenta os resultados do balanço de energia elétrica da casa Ekó durante o período do Solar Decathlon. Durante todo o período analisado, a produção de eletricidade é superior ao consumo e grande parte da eletricidade produzida é exportada para a rede elétrica. Para cada dia analisado, a energia E_{-ca.c.d} (curva amarela) é menor que a energia total consumida. Isto se deve ao fato que ambos, energia elétrica produzida e energia elétrica consumida, não correspondem ao mesmo período de tempo. A energia neto (curva cinza) representa a diferença entre a curva de geração e a curva de consumo de eletricidade. Através da análise da figura 64 percebe-se que a capacidade instalada do sistema solar FV foi dimensionada muito acima do que deveria possuir na prática para prover a energia que a edificação realmente necessita. Durante o final de semana da competição, por exemplo, dias pelos quais o consumo é mais baixo, o sistema solar FV produziu por volta de seis vezes a energia demandada pela edificação, como pode ser observado no gráfico nos dias 22 e 23 de setembro. No período de maior geração no SDE, o sistema produziu cinco vezes mais do que a demanda da edificação, conforme pode ser observado na curva do dia 24 de setembro. Nestes termos, é importante salientar que a proposta da casa Ekó deveria ser reajustada para tornar sua viabilidade econômica mais efetiva com a realidade de mercado. Com um sistema solar FV superdimensionado, esta edificação poderia exportar a energia excedente para outras edificações próximas para minimizar o efeito das perdas no transporte da energia, ou na prática das tarifas premium atuais, exportar o excedente para a rede elétrica contabilizando em créditos de energia. Todavia, os incrementos de taxas nas tarifas de energia da rede elétrica, mesmo para os produtores de energia fotovoltaica, desestimulam a custos de geração fotovoltaica tornam-se autoprodução porque os incompetitivos devido aos reajustes impostos pelas concessionárias de energia. Por isso, atualmente, os edifícios auto-suficientes com sistema de estoque de energia e gestão de energia, estimulados pela redução nos preços dos módulos FV, estão se tornando uma realidade, com o propósito de igualar o custo de produção fotovoltaico com o custo da tarifa da rede elétrica.



Figura 63. Diferentes tipos de energia elétrica em função do tempo, representado o balanço energético da edificação no dia 19 de setembro de 2012. Intervalo de medição de 15 min.



Figura 64. Balanço de energia elétrica da edificação durante o Solar Decathlon.

4.2 Cenários de desempenho de energia elétrica de edificações do Solar Decathlon

Uma das maneiras escolhidas de avaliar as casas da competição Solar Decathlon é através da análise da relação entre a energia elétrica produzida pelos sistemas solares ativos e a intensidade de utilização de eletricidade (SDE, 2012). Devido ao sombreamento natural do terreno da Casa de Campo, a eletricidade produzida pelas equipes foi computada pela organização do SDE durante os intervalos do dia em que as casas estão livres de sombras. A Figura 65 apresenta a comparação entre as cinco casas referentes à potência elétrica produzida em corrente alternada, P-ca, nos períodos sem sombreamento. Os valores de P_{-ca} das outras casas foram obtidos pelo sistema de aquisição de dados da organização do SDE disponibilizados pelo site: www.sdeurope.org. A produção de energia elétrica das edificações foi determinada pela tecnologia dos módulos fotovoltaicos, pela inclinação dos módulos e pela quantidade de geradores (potência instalada). Três casas (Ekó, Canopea e Counter Entropy) não apresentam interrupções na curva de geração solar. A casa Patio 2.12 apresenta uma queda na geração durante 45 minutos, das 14h30min até as 15h15min. Esta queda pode ter ocorrido devido a uma falha do sistema solar FV, uma falha do sistema de medição ou ainda devido a um eventual desligamento do sistema para manutenção. Por sua vez, na casa Omotenashi, desde o início do período de geração solar até às 10h45min, não foram registradas medições e por volta das 13h30min houve uma leve queda na produção.

Conforme observado na Figura 65, a produção de energia elétrica da casa Ekó é superior às das demais equipes e este resultado manteve-se durante todo o período do SDE. Em comparação com a casa Canopea, no dia 19 de setembro, a produção de energia da casa Ekó foi 14,55 kWh superior. A inclinação dos módulos FV exerce influência significativa na capacidade de produção das duas casas. Conforme dados do Meteonorm, a melhor inclinação para a captação da radiação solar na latitude de Madri no mês de setembro está em torno de 25º a 30º. A inclinação dos módulos FV da casa Canopea e da casa Ekó são 5º e 15º respectivamente. Através disso, percebe-se que os módulos FV da casa Ekó estão mais próximos da inclinação ideal para o período. Outro aspecto que diferencia a produção de energia entre as duas edificações é a capacidade de potência elétrica instalada do sistema FV.

Em comparação com a casa Patio 2.12, a média diária de produção de eletricidade da casa Ekó é 11 % superior, sendo que a potência instalada da casa Patio 2.12 é levemente superior e utiliza a mesma tecnologia de módulos fotovoltaicos. Todavia, como no caso anterior, os painéis FV da casa Ekó estão mais próximos da inclinação ideal. A influência da qualidade da instalação

elétrica do sistema FV e as perdas de energia nos módulos, inversores e condutores elétricos são também fatores que determinam a capacidade de produção de um sistema. A média diária de produção de eletricidade da casa Ekó durante a competição foi de 45,7 kWh, sendo que a produção total durante este período foi de 502,8 kWh.



Figura 65. Comparação da potência elétrica produzida em corrente alternada entre cinco casas no dia 19 de setembro na competição Solar Decathlon.

A Figura 66 mostra a diferença de produtividade final (Y_F) entre as cinco casas. A comparação da produtividade entre as casas é válida porque as edificações encontram-se no mesmo local, com o mesmo recurso solar, sendo que esta característica, muito importante para sistemas solares fotovoltaicos, é semelhante em todos os casos analisados. A casa Ekó apresenta a maior produtividade diária (Y_F = 45,54 kWh/kW_p) devido a sua capacidade instalada de geradores FV. Durante a competição a média da produtividade da casa Ekó foi de 4,15 kWh/kW_p. Ao mesmo tempo, um sistema bem dimensionado melhora a produtividade do sistema, pois diminui as perdas relativas à baixa irradiância (ALMEIDA, 2012). Por outro lado, o inversor limita a potência de entrada por questões de segurança, limitando a capacidade de produção. A eficiência do inversor FV é outro fator que exerce influência na produtividade final.

A casa Counter Entropy, apesar de apresentar a menor produção de eletricidade durante a competição (E_{-ca} = 287,65 kWh), apresenta a segunda maior produtividade fotovoltaica (Y_F = 42,61 kWh/kW_p). Isto se deve à capacidade do sistema solar fotovoltaico operar na faixa de potência nominal

dos geradores produzindo uma quantidade de energia proporcional à potência instalada do sistema. A principal vantagem desta edificação em relação às demais é o uso de um sistema de irrigação instalado na cobertura da casa utilizado para resfriar os geradores fotovoltaicos com a elevação da temperatura. Este foi um dos fatores que levaram ao aumento da produtividade final, já que o resfriamento dos módulos nas temperaturas mais elevadas eficiência fotovoltaica aumentando aumenta а consequentemente а produtividade do gerador FV. Patio 2.12 e Canopea apresentaram curvas de produtividade quase semelhantes, com uma média de produtividade de 3,36 e 3,34 kWh/kWp, respectivamente. As edificações com baixa produtividade sofrem influência da potência elétrica total instalada do sistema e da inclinação dos módulos FV, já que captam menos radiação solar por unidade de área, diminuindo a capacidade do gerador de operar próximo de sua potência nominal. Outros fatores podem reduzir a produtividade final, tais como: instalações mal sucedidas causando perdas ôhmicas nos condutores elétricos, falhas ou desligamentos do inversor ou sombreamento nos módulos.



Figura 66. Comparação da produtividade final fotovoltaica (Y_F) característica de Madri entre cinco casas da competição Solar Decathlon. Desvio azimutal do Norte: 180°.

Diferentes cenários de correlação temporal entre geração e consumo de eletricidade no dia 19 de setembro do Solar Decathlon são apresentados a seguir pela Figura 67. Para efeito de comparação, a correlação temporal da 127

casa Ekó pode ser observada pela Figura 63. Através da Figura 67, percebe-se que a correlação temporal instantânea difere entre as casas, e os índices de correlação são atribuídos às atividades de cada edificação. Ainda conforme a figura foi verificado que os maiores valores do índice de correlação temporal ξ ocorrem quando E_{-ca,c} aumenta, ou seja, quando os períodos de produção correspondem aos períodos de consumo. O índice ξ diminui quando a energia consumida é maior ou quando a energia é consumida fora dos períodos de produção fotovoltaica.



Figura 67. Cenários de média de correlação temporal entre geração e consumo de energia elétrica no dia 19 de setembro no Solar Decathlon. Curvas em azul: Potência elétrica produzida em c.a., P_{-ca}. Curvas em vermelho: Potência elétrica consumida, P_c.

Observando os valores da média diária do índice de correlação ξ das casas no dia 19 de setembro, verifica-se que a casa Patio 2.12 apresenta o maior índice ξ porque consome grande parte da energia elétrica diária durante os períodos de produção fotovoltaica e fora do período de geração solar o consumo é muito baixo devido ao uso de equipamentos e sistemas elétricos eficientes. De fato, uma das vantagens desta casa é a utilização de um banco de baterias capaz de armazenar a eletricidade produzida pelo sistema FV possuindo a capacidade de igualar as curvas de geração-consumo com a injeção de energia das baterias para a carga. Neste sentido, com a aplicação de gerenciamento pelo lado da demanda com inversores controláveis e sistema de estoque de energia é possível deslocar a curva de consumo para os períodos de geração solar e assim otimizar o fator de auto-consumo para que a rede elétrica seja utilizada somente nos casos de carência solar mesmo que nos períodos noturnos pode-se utilizar a energia estocada no banco de baterias.

O índice de correlação médio da casa Ekó da Figura 63 é de 22,5, muito semelhante ao índice da casa Patio 2.12, porém o consumo é ligeiramente maior durante após os períodos de geração solar. Já no caso da casa Counter

Entropy, ξ é menor que os dois casos anteriores porque a carga elétrica apresenta um consumo superior durante os períodos de produção fotovoltaica, passando de 3 kW em alguns momentos. Nos dois últimos casos, o consumo de eletricidade após o período de geração solar é superior aos demais casos, não apresentando uma boa correlação da curva de consumo com a curva de produção e por isso o índice ξ é reduzido.

O cenário de consumo total diário das equipes no dia 19 de setembro é apresentado na Figura 68 mostrando que a casa Counter Entropy apresenta o maior consumo entre os casos analisados. O consumo total diário desta edificação é de 25,40 kWh (consumo médio diário de 0,26 kWh), 6 % maior que a casa Ekó. Já a Patio 2.12 apresenta o valor de consumo mais baixo, com um consumo médio diário de 0,15 kWh, quase 30 % menor que a casa Counter Entropy. Durante o contexto da competição, as casas que apresentaram o menor uso de eletricidade por unidade de área foram a Patio 2.12 e a Canopea.



Figura 68. Perfil de consumo total diário de eletricidade de edificações do Solar Decathlon. Data de medição: 19 de setembro. Intervalo de medição: 15 min.

4.3 Comparações dos resultados simulados

4.3.1 Distribuição de energia elétrica diária

Esta seção avalia os resultados referentes aos dados simulados no EnergyPlus com os dados medidos durante a operação da casa no SDE. Os dados referem-se à distribuição de energia elétrica diária para diferentes tipos de energia conforme determinado nos procedimentos experimentais da Seção 3.7 página 100. As variáveis analisadas neste capítulo correspondem às variáveis do balanço energético entre geração do SFVCR ($E_{-cc,d}$; $E_{-ca,d}$; $P_{-ca,d}$; $E_{exp,d}$; $E_{imp,d}$; $E_{p,inv,d}$; $H_{tot,d}$; $T_{mod,d}$; η_I) e consumo de energia elétrica ($E_{eletro,d}$; $E_{ilum,d}$; $E_{cond,ar,d}$).

O consumo de eletricidade total da casa Ekó durante o período da competição, medido através do sistema de aquisição de dados da organização do SDE, foi de 155,60 kWh. Para efetuar as simulações do consumo diário no EnergyPlus durante o período analisado e determinar a parcela de cada carga elétrica no balanço de consumo energético foi considerado o tempo de funcionamento diário das cargas, conforme determinaram as regras da competição. As cargas elétricas foram divididas em classes individuais ou em pequenos grupos de cargas, conforme as medições de consumo de eletricidade realizadas pelos medidores ME1zr instalados na casa. Através da aplicação do consumo médio diário determinado pela Tabela 6 foi estimada uma potência elétrica consumida diária para cada carga elétrica utilizada em um determinado dia. Assim, foi possível estimar a energia consumida diária baseada nas estimativas de potência elétrica e tempo de uso. Todavia, as medições indicam variações no consumo diário durante a competição, já que são realizados diferentes tipos de tarefas a cada dia. Assim, o tempo de funcionamento das cargas elétricas foi estimado conforme as tarefas desenvolvidas no decorrer da competição e como resultado gerou-se diferentes cenários de consumo energético. A Figura 69 mostra o perfil de consumo de um dia típico da semana do Solar Decathlon $(E_{c,d} = 14,75 \text{ kWh})$, no qual foram realizadas tarefas programadas e medições de desempenho da casa. O sistema de condicionamento de ar em modo de resfriamento apresenta o maior consumo de eletricidade ($E_{cond.ar.d} = 3,65$ kWh), já que corresponde à maior carga da edificação. O consumo médio diário dos inversores é de 7,2 Wh e não foi incluído no balanço devido ao baixo consumo de eletricidade. Durante o final de semana, o consumo das cargas elétricas é diferente e muitos equipamentos elétricos permanecem desligados. O consumo de eletricidade neste período (22 e 23 de setembro) é de 13,9 kWh.

Um cenário típico de consumo com distribuição diária da televisão, DVD e computador, sistema de iluminação interna e máquina de lavar roupas pode ser observado pela Figura 70. As cargas elétricas funcionam das 8h às 22h. É possível perceber que o consumo do sistema de iluminação interna é realizado após as 15h e o ciclo da máquina de lavar roupas é de 1 hora. O consumo da máquina de lavar é de 0,29 kWh/ciclo conforme fornecido pelo fabricante. Já a televisão, DVD e computador são cargas que funcionam em diferentes horários do dia apresentando um consumo máximo de 0,12 kWh.



Figura 69. Cálculo do consumo de eletricidade da casa Ekó em um dia típico do Solar Decathlon.



Figura 70. Distribuição diária de energia elétrica consumida pela TV, DVD e computador, sistema de iluminação interna e máquina de lavar roupas.

Os cálculos efetuados para estimar o comportamento do consumo de eletricidade diário da edificação durante o SDE são mostrados na Tabela 10. O maior consumo corresponde ao dia 20 de setembro ($E_{c,d} = 22,15$ kWh), representando 14,23 % do consumo total durante o período analisado.

A Figura 71 mostra o cenário de consumo energético das cargas elétricas da edificação com valores calculados. O sistema de condicionamento de ar corresponde à maior parcela de consumo com 35 %. A iluminação interna representa 5 % do consumo energético da casa, muito menor se comparado a um sistema de iluminação com lâmpadas fluorescente compacta que representa 8 % na parcela de consumo de um apartamento de 130 m². O conjunto de cargas elétricas externa da casa (sistema de iluminação externa, máquina de lavar roupas e Quadro de Automação externo – QA1) representam juntos 12 %, o segundo maior consumo da casa. O refrigerador/freezer é o único eletrodoméstico que permanece ligado continuamente e por isso corresponde a 10 % do consumo. Já o cooktop é uma das cargas elétricas mais importantes da casa e representa 9 % da parcela de consumo.

Data	Dia da semana	Consumo total diário	Parcela (%)
17 Set	Segundo foiro	((()))	10.00
17 Set	Segunda-Tella	21,51	13,02
18 Set	Terça-feira	17,12	11,00
19 Set	Quarta-feira	20,16	12,95
20 Set	Quinta-feira	22,15	14,23
21 Set	Sexta-feira	14,22	9,14
22 Set	Sábado	7,93	5,10
23 Set	Domingo	5,93	3,81
24 Set	Segunda-feira	14,76	9,48
25 Set	Terça-feira	11,67	7,50
26 Set	Quarta-feira	20,17	12,96
SOMA	-	155,60	100
MÍNIMO	-	5,93	3,81
MÁXIMO	-	22,15	14,23

Tabela 10. Cálculo do consumo de energia elétrica diário da edificação.



Figura 71. Cálculo da parcela do consumo de eletricidade das cargas elétricas da edificação durante o Solar Decathlon.

A comparação entre a energia consumida total diária ($E_{c,d}$) e a energia elétrica diária importada da rede elétrica ($E_{imp,d}$) é dada pela Figura 72. É possível perceber uma boa aproximação das curvas de $E_{c,d}$ e $E_{imp,d}$ entre o caso real (medido) e o caso simulado. A boa aproximação entre as curvas deve-se principalmente ao tratamento diário dos dados de consumo. Através dos dados medidos diariamente para os grupos de cargas elétricas foi possível estimar o consumo de eletricidade diário com maior precisão, no qual foram criados schedules no programa para os diferentes cenários durante o período analisado. Com isso foi possível ajustar a curva de dados simulados com a curva de dados experimentais.

Durante os períodos em que a geração solar fotovoltaico não é suficiente para suprir a carga, o sistema utiliza a rede elétrica como *backup*, havendo neste caso, importação de energia da rede ($E_{imp,d}$). É possível perceber que a curva de $E_{imp,d}$ apresenta similaridade com a curva de $E_{c,d}$, pois $E_{imp,d} = E_{c,d} - E_{-ca,d}$ quando $E_{-ca,d} < E_{c,d}$. Porém os valores de $E_{c,d}$ são maiores que $E_{imp,d}$ porque a edificação não importa energia da rede nos períodos de geração solar, exclusivamente quando $E_{-ca,d} > E_{c,d}$. De fato, nos períodos de geração solar, a energia consumida pela casa é igual a $E_{-ca,d} - E_{exp,d}$, ou seja, a energia é igual a energia produzida pelo sistema fotovoltaico e diretamente consumida pela carga ($E_{-ca,c,d}$).



Figura 72. Comparação entre dados medidos e simulados de E_{c,d} e E_{imp,d}.

Os resultados das simulações de desempenho energético diário do sistema solar fotovoltaico, com arquivo climático TMY2 do período do SDE 2012, são apresentados pela Figura 73. A energia elétrica produzida pelo sistema FV, simulada no EnergyPlus depende do arquivo climático local. Em comparação com os arquivos climáticos IWEC (International Weather for Energy Calculations) e SWEC, o arquivo climático TMY2 de Madri apresentou melhor precisão nos resultados guando comparados com os dados medidos. Conforme indicam as simulações, durante o período analisado o montante total de energia elétrica produzida em corrente contínua (E-cc.d) foi de 568 kWh e a produção total em corrente alternada (E-ca,d) foi de 540 kWh. A curva verde ilustrada na figura 73 mostra a média diária da potência elétrica produzida em corrente alternada (P-ac.d). A média da potência elétrica produzida durante o período considerado é de 2,25 kW. A comparação entre a potência elétrica em c.a. (P-ca.d) medida e simulada é apresentada pela Tabela 11. Conforme mostrado na Tabela, o erro total de P-ac.d é de 1,48 %. Os erros encontrados na tabela exibem boa compatibilidade entre os resultados apresentando somente dois dias com erro acima de 10 % (dia 17/09 e 25/09). Entre os dias 19/09 e 22/09 o erro médio é de aproximadamente 2 %.



Figura 73. Resultados das simulações de energia e potência elétrica produzida pelo sistema solar fotovoltaico. Arquivo climático de simulação: TMY2 de Madri do período do SDE 2012.

	Potência elétrica média, P _{-ca,d} (W)		
Data	Medido	Simulado	Erro (%)
17/09	1.714	2.102	10,15
18/09	1.807	1.645	4,70
19/09	2.596	2.492	2,05
20/09	2.091	2.189	2,30
21/09	2.495	2.395	2,05
22/09	2.511	2.392	2,40
23/09	1.845	2.142	7,50
24/09	2.754	2.496	5,00
25/09	1.909	2.372	10,80
26/09	2.124	2.278	3,50
TOTAL	21.846	22.503	1,48

Tabela 11. Comparação entre os resultados medidos e simulados de P-ca,d.

Os resultados das simulações de perdas de energia elétrica nos inversores do sistema devido à dissipação de calor no processo de conversão c.c - c.a ($E_{p,inv,d}$) em função da eficiência de conversão dos inversores (η_I) são apresentados pela Figura 74. A energia total perdida na forma de calor ($E_{p,inv}$) é de 27 kWh correspondendo a diferença entre E_{-ca} e E_{-cc} . Durante o período analisado, a média da eficiência dos inversores é de 90 %. A eficiência dos inversores varia proporcionalmente com as perdas de energia térmica nos inversores, porém esta redução relaciona-se também com outros fatores como

o aumento da temperatura. Nos períodos em que existe diminuição da eficiência do inversor o que ocorre de fato é um aumento da tensão de entrada em c.c. no inversor ocasionado pelo aumento da tensão de operação do arranjo fotovoltaico (V_{mpp}).



Figura 74. Resultados das simulações de perdas de energia elétrica nos inversores ($E_{p,inv,d}$) sobre a eficiência do inversor fotovoltaico (η_I).

A comparação entre os resultados experimentais, medidos nos inversores pelo sistema de aquisição de dados, e os resultados simulados no EnergyPlus de E_{-ca,d} e E_{exp,d}, com arquivo climático TMY2 do período do SDE 2012, são mostrados pelas Figuras 75 e 76. As simulações de geração de energia solar FV no EnergyPlus avaliam a inclinação da superfície que contém os módulos FV estabelecida no modelo computacional de simulação, a orientação desta superfície e os dados climatológicos do arquivo TMY2 para efetivação dos cálculos no programa. Para tal finalidade, utiliza-se a classe de objetos do gerador fotovoltaico (*Generator: Photovoltaic*), atribuindo o nome da superfície em que estão instalados os módulos FV através do campo *Surface Name*.

Os resultados medidos e simulados apresentaram variações ao longo do período analisado. Cinco dias apresentaram um erro de E_{-ca} menor do que 2 %, confirmando uma boa aproximação entre o caso real e o caso simulado. Os maiores erros apresentados de $E_{-ca,d}$ foram de 16 % no dia 25/09 e 10 % no dia 23/09. Já em relação a $E_{exp,d}$ os maiores erros apresentados foram de 20 % no dia 17/09 e de 16,5 % no dia 25/09. A incompatibilidade entre os dados encontrados nestas análises pode ocorrer devido à disparidade entre as medições de irradiância solar do sensor instalado na cobertura da casa (célula de referência) e as medições dos sensores da estação climática localizada a

cerca de dois quilômetros da edificação. Devido a isto, os cálculos de energia elétrica gerada pelo sistema, efetuados no programa utilizando dados de entrada de radiação solar da estação climática Weather Analytics, diferem dos valores medidos nos inversores pelo sistema de aquisição de dados. O efeito da cidade no microclima, gerados normalmente por elementos como corpos de água ou vegetação, pode também ser um fator determinante na disparidade dos resultados devido à diferença na temperatura ambiente entre a edificação e a estação climática. Através das análises apresentadas, é possível verificar que os erros podem variar para cada período analisado, podendo chegar à faixa dos 20 % em alguns casos. Por isso, a fim de estimar com certa precisão os resultados das simulações aproximando-se do caso real, uma margem de erro deve ser considerada nos resultados de E_{-ca} e E_{exp} executados no programa EnergyPlus.



Figura 75. Comparação entre os resultados medidos e simulados de E_{-ca,d}. Arquivo climático de simulação: TMY2 de Madri do período do SDE 2012.



Figura 76. Comparação entre os resultados medidos e simulados de E_{exp,d}. Arquivo climático de simulação: TMY2 de Madri do período do SDE 2012.

Através das simulações, foi observado que os modelos de geradores e inversores do programa EnergyPlus exercem influência significativa na geração de energia elétrica. O modelo matemático que apresentou os resultados mais compatíveis com os resultados experimentais é o modelo Sandia devido principalmente à sua complexidade. A vantagem deste modelo é que o desempenho de um arranjo idêntico de módulos fotovoltaicos é assumido ser linear com o número de módulos em série e em paralelo. Já em relação ao modelo de inversor, a melhor precisão é do modelo LookUpTable pelo fato de que este modelo efetua os cálculos de eficiência com base nos valores momentâneos de tensão e potência nominal de operação, formando, portanto, um limite de produção a partir dos geradores fotovoltaicos.

As comparações horárias entre as curvas medida e simulada de E_{-ca} , entre os dias 17 a 19 de setembro, são apresentadas pela Figura 77. Para tal proposta, foram utilizados intervalos de medições de 15 minutos. As curvas experimentais ilustradas na figura apresentam variações ao longo do dia, determinada, sobretudo, pela variação da irradiação solar incidente no plano dos geradores. Por outro lado, as curvas simuladas não apresentam as variações momentâneas ao longo do tempo como ocorrem nos casos anteriores. Observa-se, contudo, que as curvas simuladas se aproximam mais claramente de uma senóide que representa o percurso solar diário. As aproximações das curvas do dia 19/09 demonstram a boa compatibilidade de dados e conforme indica o coeficiente de correlação da reta (R^2) indicado pela Figura 78, neste período os valores medidos e simulados aproximam-se em 98 %. Já para os dias 17/09 e 18/09 os valores aproximam-se em 80 % e 63 %, respectivamente. É possível observar no dia 18/09 que os valores de pico mais importantes de E_{-ca} simulado, durante o Sol a pino, são inferiores aos valores

da curva medida. Durante o maior pico diário registrado às 14h, a diferença entre os valores pode chegar a 1,2 kWh. Para o período analisado na figura 77, a média diária medida de $E_{-ca,d}$ é de 0,6 kWh, enquanto que nas simulações esta média é de 0,66 kWh (imprecisão de apenas 60 Wh).

As comparações horárias entre as curvas medida e simulada de E_{exp} , entre os dias 17 a 19 de setembro, são apresentadas pela Figura 79. Da mesma maneira que ocorre com E_{-ca} , as curvas simuladas de E_{exp} não apresentam as variações momentâneas ao longo do tempo como ocorrem com as curvas medidas. A melhor aproximação dos valores medidos e simulados ocorre no dia 19/09, e conforme indicado pelo coeficiente de correlação da reta (R^2) da Figura 80, neste período os valores medidos e simulados aproximam-se em 92 %. Contudo, algumas variações momentâneas na curva medida não ocorrem na curva simulada e os valores de pico mais importantes de Sol a pino diferem em até 0,15 kWh. Conforme indica a figura, as aproximações dos valores nos dias 17/09 e 18/09 são menos significativas, e neste caso os valores aproximam-se entre si em 71 % e 55 % respectivamente. Para o período analisado na figura 79, a média diária medida de E_{exp} é de 0,52 kWh, enquanto que nas simulações esta média é de 0,59 kWh (imprecisão de apenas 70 Wh).

Através destas análises é possível concluir que mesmo com a dispersão dos pontos em relação à reta linear, valores aproximados utilizando simulações computacionais podem indicar estimativas válidas da energia elétrica produzida e da energia que está sendo injetada na rede elétrica nos períodos de geração solar.



Figura 77. Comparações horárias entre as curvas medidas e simuladas de E_{-ca} de 17 a 19 de setembro. Arquivo climático de simulação: TMY2 de Madri do período do SDE 2012.



Figura 78. Perfil de aproximação dos valores medidos e simulados com a reta linear. Data de análise: 19 de setembro.



Figura 79. Comparações horárias entre as curvas medidas e simuladas de E_{exp} de 17 a 19 de setembro. Arquivo climático de simulação: TMY2 de Madri do período do SDE 2012.



Figura 80. Perfil de aproximação dos valores medidos e simulados com a reta linear. Data de análise: 19 de setembro.

A comparação do balanço de energia elétrica entre o caso real e o caso simulado durante todo o período do Solar Decathlon pode ser observado pela Figura 81. Os valores de $E_{-ca,d}$ e $E_{exp,d}$ apresentam a maior diferença de valores. A diferença de $E_{-ca,d}$ medido e calculado é de 50,6 kWh, enquanto que para $E_{exp,d}$ esta diferença é de 53 kWh. O erro total de $E_{-ca,d}$ e $E_{exp,d}$ é de 5 %, e 6 % respectivamente. Já as simulações de $E_{c,d}$ e $E_{imp,d}$ são mais precisas 141 porque o consumo diário da carga foi ajustado conforme o perfil de atividades desempenhadas na edificação durante o SDE. O erro total de $E_{c,d}$ e $E_{imp,d}$ é 0,76 % e 4 % respectivamente.

Conforme os resultados da Figura 81, em dez dias de análise observou-se a imprecisão entre os resultados medidos e simulados de $E_{-ca,d}$, o que equivale a um dia de geração solar que podem ser adicionados no montante de geração devido às imprecisões nas simulações. Considerando uma produção mensal equivalente à produção dos 10 dias analisados, a energia $E_{-ca,d}$ medida e simulada será igual a 1,47 MWh e 1,62 MWh, respectivamente, e considerando a média diária de produção do período analisado no SDE, nesta ocasião haverá aproximadamente três dias que podem ser adicionados ao montante de produção mensal do sistema FV devido às imprecisões nos resultados, ou seja, o sistema estará produzindo eletricidade em 33 dias quando na verdade espera-se uma produção de 30 dias. O mesmo ocorre nas imprecisões das simulações de $E_{exp,d}$. Porém estes resultados dependerão da sazonalidade em questão e da média real mensal de produção de energia.

Com estas conclusões, percebe-se que os resultados das simulações podem determinar um nível de produção de energia diferente de um caso real já que os dados reais de radiação solar incidente no plano dos geradores FV podem sofrer variações significativas em cada caso. Desta forma, uma margem de erro deve ser considerada na estimativa do desempenho de um sistema solar FV para garantir a compatibilidade entre os dados reais e simulados.



Figura 81. Comparação do balanço de energia elétrica diário entre resultados medidos e simulados durante o Solar Decathlon.

4.3.2 Variáveis climáticas diárias

4.3.3 Radiação Solar

A comparação entre o caso real e simulado relacionado à intensidade de radiação solar incidente no plano dos módulos fotovoltaicos (G_{tot,d}) foi investigada durante o período de análise deste trabalho e é apresentada pela Figura 82. Os dados experimentais de radiação solar foram determinados pela célula de referência de a-Si Sunny Sensor Box. Por sua vez, as simulações de radiação solar no EnergyPlus avaliam a inclinação da superfície que contém os módulos FV estabelecida no modelo computacional de simulação, a orientação desta superfície e os dados climatológicos do arquivo TMY2 de Madri. Para estimar a irradiância solar incidente no plano dos geradores fotovoltaicos, utiliza-se a variável de saída *Surface Exterior Solar Incidente*. O EnergyPlus utiliza como variáveis de entrada a irradiância solar direta normal e a irradiância solar difusa horizontal aplicando os dados do arquivo climático no modelo empírico de Perez (PEREZ et al., 1990) baseado em medições reais de irradiância e em seguida calcula a irradiância solar incidente no plano dos geradores.

Os resultados da soma diária da irradiância solar G_{tot.d} com valores medidos e simulados apresentaram variações ao longo do período analisado. É possível encontrar erros de até 19 % na comparação entre os resultados, demonstrando que as simulações podem apresentar disparidade nos cálculos apresentados de irradiância solar. Durante os dez analisados o erro médio foi de 10 %. Da mesma forma que ocorre com as comparações dos resultados diários de E-ca.d e E_{exp.d}, os erros de G_{tot.d} são justificados pelas diferenças entre as medições de radiação solar efetuadas pela célula de referência e aquelas efetuadas pelo(s) piranômetro(s) na estação climática do Weather Analytics utilizadas para dados de entrada no EnergyPlus. A diferença na inclinação, a calibração e a precisão dos sensores são fatores que podem influenciar na diferença entre os resultados. Um ponto fundamental que deve ser considerado é o desvio do ângulo zenital do Sol devido à inclinação dos sensores. Os piranômetros são normalmente instalados em uma superfície horizontal nas estações climáticas, de modo que a célula de referência da casa foi instalada sob a mesma inclinação dos módulos fotovoltaicos (i = 15º). Desta maneira, os cálculos efetuados no programa EnergyPlus utilizam um fator de correção para adeguar a radiação solar incidente à inclinação da superfície exterior determinada no modelo de simulação. Com respeito à precisão dos sensores, a célula de referência Sunny Sensor Box é constituída de silício amorfo hidrogenado e é menos precisa que o(s) piranômetro(s) utilizados na estação climática. Os piranômetros são sensores de alta precisão que trabalham sob uma base térmica de precisão. Porém, devido às rápidas flutuações na radiação solar,

como por exemplo, em céu parcialmente nublado, o sensor pode sofrer um retardo na resposta das medições e os dados podem não ser satisfatoriamente coletados (DGS, 2008). Já no caso das células de referência de sistemas fotovoltaicos, os sensores constituem-se de células de silício que emitem uma corrente proporcional à radiação solar. Todavia, devido à sensibilidade espectral destes sensores, certos componentes da radiação solar não são capturados corretamente (DGS, 2008). É importante salientar que a aplicação de células de referência para sistemas fotovoltaicos com mesma tecnologia dos módulos FV pode aumentar a precisão da radiação solar incidente medida no plano dos geradores devido à sensibilidade espectral de cada tecnologia fotovoltaica. Todavia, isto não ocorre no sistema solar FV da casa Ekó, pois na estação solarimétrica da edificação foi instalada uma célula de referência de a-Si com tecnologia diferente dos módulos fotovoltaicos (m-Si). Assim, para aumentar a precisão das de radiação solar medidos na casa seria necessário instalar uma célula de referência de silício cristalino.



Figura 82. Comparação entre os resultados medidos e simulados de G_{tot,d}. Arquivo climático de simulação: TMY2 de Madri do período do SDE 2012.

A Figura 83 apresenta comparações horárias entre as curvas medidas e simuladas de G_{tot} entre os dias 17 a 19 de setembro. Para efetuar as comparações, foram utilizados intervalos de medições de 15 minutos. Da mesma maneira que ocorre com as curvas simuladas de E_{-ca} e E_{exp}, a curva de G_{tot} simulada não apresenta as variações momentâneas ao longo do tempo conforme ocorre com a curva experimental. Devido ao retardo na resposta do(s) sensore(s) da estação climática do Weather Analytics ocasionados pelas rápidas flutuações na radiação solar em dia de céu nublado, como ocorre nos dias 17/09 e 18/09, e as mudanças bruscas na radiação solar adicionados às 144
imprecisões na célula de referência, percebem-se as discrepâncias entre os resultados medidos e simulados. Já em dia de céu claro, como no dia 19/09, a radiação solar incidente nos sensores é mais estável e não altera significativamente a precisão dos aparelhos devido à mudança de estado térmico. Sendo assim, as aproximações entre as curvas são mais precisas que os dias anteriores como indicado pela regressão linear da Figura 84. Conforme pode ser observado pelo coeficiente de correlação da reta (R²) da figura, neste período os valores medidos e simulados aproximam-se em 99 %. No dia 19/09, a diferença mais significativa entre os valores ocorre no horário de pico de G_{tot}, pelo qual a discrepância entre os valores medidos e calculados é de 100 W/m². De fato, nos períodos com maior nível de irradiância solar a temperatura ambiente torna-se mais elevada e a sensibilidade térmica dos sensores varia o estado de saída das medições, alterando a precisão dos sensores, e por isso ocorre uma diferença significativa nas aproximações entre as curvas. Os resultados do dia 17/09 indicam uma boa correlação entre as curvas no início da manhã, porém a curva medida apresenta variações na forma de onda a partir das 10 horas ocasionados pela intervenção de nuvens. Contudo, estas variações não ocorrem na forma de onda simulada, pelo qual a mesma se apresenta como uma forma típica de onda do percurso solar diário. Existem também desvios entre as curvas nos horários de pico de Gtot conforme foi observado no dia 19/09. As mesmas variações da forma de onda medida não ocorrem com a forma de onda simulada para o dia 18/09. Neste período, a irradiância solar medida pela célula de referência atingiu o maior pico diário às 14 horas ($G_{tot} = 967 \text{ W/m}^2$). As aproximações dos valores com a reta linear nos dias 17/09 e 18/09 são menos precisas e os valores aproximam-se entre si em 86 % e 62 % respectivamente. As quedas repentinas de G_{tot} da curva medida no dia 18/09, que ocorre durante o período das 15h45min até volta das 18h, característico de céu coberto por nuvens, contribuiu na precisão das medições devido à distinção da sensibilidade espectral de cada sensor que está sendo comparado. O fator de calibração dos sensores também contribui na disparidade dos resultados. Para o período analisado na figura 83, a média diária medida de G_{tot} é de 248 W/m², enquanto que nas simulações esta média é de 292 W/m².



Figura 83. Comparações horárias entre as curvas medidas e simuladas de G_{tot} de 17 a 19 de setembro. Arquivo climático de simulação: TMY2 de Madri do período do SDE 2012.



Figura 84. Perfil de aproximação dos valores medidos e simulados com a reta linear. Data de análise: 19 de setembro.

4.3.4 Temperatura dos módulos fotovoltaicos

Em energia solar fotovoltaica, a temperatura dos módulos apresenta grande influência no seu desempenho. Quanto maior a temperatura do módulo fotovoltaico (T_{mod}), maiores são as perdas do sistema e consequentemente menor é a geração de energia. A Figura 80 apresenta a comparação entre as medições de T_{mod} medidas pelo sensor Pt100 e as simulações no EnergyPlus para o dia 18 de setembro. O coeficiente de correlação da reta (R^2) de T_{mod} calculado indica que os valores medidos aproximam-se em 89 % dos valores simulados. As simulações possuem uma média diária de temperatura de 36°C, sendo que os dados medidos com o sensor esta média é de 33,5°C (erro de 3,6 %).

Dentre as variáveis analisadas neste trabalho, $T_{mod,d}$ apresentou a melhor precisão nas comparações entre o caso real e simulado conforme pode ser observado pela Tabela 14. Houve erro de medição da temperatura em três dias de medições, assim as comparações foram efetuadas para sete dias. O maior erro apresentado foi de 3,6 % e o mínimo de 0,36 %. O erro total do período da média da temperatura do gerador FV foi de apenas 0,75 %. As boas aproximações entre os valores medidos e simulados de $T_{mod,d}$ deve-se sobretudo à precisão do sensor Pt 100 instalado na casa e à precisão do sensor de temperatura da estação climática pelo qual as medições são utilizadas como dados de entrada no EnergyPlus para cálculo de T_{mod} . Durante a competição, os módulos fotovoltaicos apresentaram temperatura máxima de 67,10°C e mínimo de 33,10°C. A média de temperatura medida dos módulos na competição foi de 36,3°C.



Figura 85. Comparação da temperatura dos módulos fotovoltaicos T_{mod} . Arquivo climático: TMY2 de Madri. Sensor de medição: Pt 100. Data de análise: 18 de setembro.

Tabela 12. Comparação entre os resultados de $T_{mod,d}$ medido pelo sensor Pt100 e os resultados simulados. Arquivo climático de simulação: TMY2 de Madri do período do SDE 2012.

Temperatura dos módulos, T _{mod,d} (°C)					
Data	Medido	Simulado	Erro (%)		
18/09	36	33,5	3,6		
19/09	38,5	40	1,9		
20/09	41	38,5	3,15		
21/09	41	40	1,25		
23/09	34	33,35	0,75		
24/09	34,5	34,25	0,36		
25/09	29	30,5	2,5		
MÉDIA	36,3	35,75	0,75		

4.4 Distribuição de energia elétrica anual

As simulações do uso de energia no EnergyPlus envolvem perdas de calor no estado estacionário e avaliam a demanda de energia mensal semi-estática e o desempenho energético dinâmico onde podem parametrizar resultados anuais ou em intervalos mais curtos. A distribuição de energia elétrica anual para as variáveis analisadas neste trabalho foi determinada através de simulações no

EnergyPlus e está apresentada pela Tabela 15. A tabela representa os valores mensais acumulados de energia elétrica consumida pelas cargas elétricas e de energia produzida pelo sistema solar FV. Para o desenvolvimento das simulações anuais foi utilizado o arquivo climático TMY2 do ano de 2012 da cidade de Madri. As variáveis de saída analisadas nas simulações são as seguintes: E_{eletro.an}, E_{ilum.an}, E_{vent.an}, E_{aque.an}, E_{resf.an}, E_{-ca.an} e E_{neto.an}. O consumo anual de E_{eletro.an} e E_{ilum.an} foram simulados conforme as estimativas de consumo médio diário dos equipamentos e sistema de iluminação da casa durante o Solar Decathlon e correspondem a 3,25 MWh e 525,6 kWh, respectivamente. As simulações do consumo do sistema de condicionamento de ar (E_{cond.ar.an}) anual foram realizadas pela equipe brasileira correspondendo a um montante de 3,17 MWh. Conforme indica a tabela, o consumo de aquecimento é nulo de maio a setembro, período com as temperaturas mais altas em Madri. Os períodos mais importantes de consumo de aquecimento ocorrem em dezembro e janeiro onde a temperatura média diária varia entre 2 a 9°C. O consumo de resfriamento ocorre com maior intensidade nos períodos mais quentes do ano entre julho e agosto. O consumo de resfriamento simulado representa anualmente um montante de 1,45 MWh. Já o consumo total anual dos inversores é muito pequeno se comparado às cargas mais importantes da casa, representando apenas 2,58 kWh.

A geração solar fotovoltaica representa um montante total anual em c.a. de 18,80 MWh com produção máxima de eletricidade no mês de julho $(E_{-ca} = 2,46 \text{ MWh})$ e produção mínima no mês de dezembro durante o inverno $(E_{-ca} = 0,69 \text{ MWh})$. A energia anual neto $(E_{neto,an})$ representa a capacidade do sistema solar em suprir o consumo de eletricidade da edificação. $E_{neto,an}$ apresenta um balanço positivo durante todo o ano, totalizando um balanço neto simulado de 11,89 MWh.

Mês	E _{eletro,an}	E _{ilum,an}	E _{vent,an}	E _{aque,an}	E _{resf,an}	E _{-ca,an}	E _{neto,an}
1	275,4	44,64	127,5	61,25	48,75	797,25	239,70
2	250,2	40,32	115	40,45	52,55	1.001,70	503,20
3	275,4	44,64	127,5	13,35	84,15	1.505,45	960,40
4	267	43,2	123,5	7,5	79,65	1.740,05	1.219,20
5	275,4	44,64	127,5	0	133,45	2.093,46	1.512,45
6	267	43,2	123,5	0	178,45	2.174,50	1.562,35
7	275,4	44,64	127,5	0	255,05	2.462,85	1.760,25
8	275,4	44,64	127,5	0	236,8	2.303,52	1.619,00
9	267	43,2	123,5	0	161,5	1.799,15	1.204,00
10	275,4	44,64	127,5	1,75	114	1.361,57	79,25
11	267	43,2	123,5	23,75	74	871,65	340,20
12	275,4	44,64	127,5	72,2	33	699,73	147,00
Total	3.246	525,6	1.501,5	220,25	1.451,35	18.810	11.890
Mínimo	250,2	40,32	115	0	33	699,70	147,00
Máximo	275,4	44,64	127,5	72,2	255,05	2.462,85	1.760,25

Tabela 13. Simulações anuais do balanço de energia elétrica da edificação em Madri (kWh). Arquivo climático: TMY2 do ano de 2012 de Madri.

Os resultados das simulações com distribuição anual de diferentes tipos de energia são apresentados a seguir. Obteve-se como resultado a energia elétrica anual produzida pelo sistema solar FV em c.c. ($E_{-cc,an}$) e c.a. ($E_{-ca,an}$) em função da irradiância solar anual no plano inclinado ($G_{tot,an}$) conforme Figura 86. O montante total anual de energia elétrica produzida em c.c. é de 19,75 MWh, 2,5 % superior à produção em c.a. Os períodos de maior produção de eletricidade correspondem aos meses do ano pelo qual a média da irradiância solar é superior a 350 W/m². A soma da irradiância total anual $G_{tot,an}$ é de 2,925 kWh/m². Os montantes de energia elétrica total anual dos outros tipos de energia representados na Figura 81 são: energia elétrica consumida pela edificação ($E_{c,an} = 6,90$ MWh); energia elétrica importada da rede elétrica ($E_{imp,an} = 1,66$ MWh); energia elétrica produzida pelo sistema solar FV e diretamente consumida pela carga ($E_{-ca,c,an} = 2,07$ MWh); energia elétrica excedente exportada para a rede elétrica ($E_{exp,an} = 16,73$ MWh).



Figura 86. Simulações da distribuição de energia elétrica anual e radiação solar incidente no plano dos geradores fotovoltaicos. Arquivo climático: TMY2 do ano de 2012 de Madri.

Para um melhor aproveitamento da energia gerada pelo sistema FV é essencial a minimização das perdas de energia elétrica nos inversores ($E_{p,inv,an}$) no processo de conversão c.c. – c.a. Conforme Bourdoucen (2000), um incremento de apenas 1 % na eficiência elétrica total dos inversores pode significar um adicional de geração de 3,6 MWh para um sistema de 400 kW_p instalado na Áustria. Contudo, o potencial de redução de perdas é ainda maior nos inversores produzidos atualmente. Quanto maior é a eficiência do inversor, menores são as perdas de conversão. As perdas térmicas nos inversores, correspondendo à diferença entre E_{-cc,an} e E_{-ca,an} estão mostradas na Figura 87. O montante total anual de perdas de energia nos inversores fotovoltaicos é de 948 kWh.



Figura 87. Simulações anuais de perdas térmicas nos inversores fotovoltaicos.

A Figura 88 apresenta os resultados das simulações de balanço de energia elétrica, baseado no método descrito por BOJIC et at. (2011). Os tipos de energia apresentados são: (1) Energia elétrica total consumida pela casa (E_{c.an}); (2) Energia elétrica produzida pelo sistema solar FV aproveitada diretamente pela casa (E_{-ca,c,an}); (3) Energia elétrica produzida pelo sistema solar FV que compensa a eletricidade importada da rede elétrica (E_{comp,an}); (4) Energia elétrica excedente injetada na rede elétrica (E_{exc.an}). Como já era esperado, os resultados indicam que a casa Ekó é um edifício à energia positiva (EEP) devido ao fato de que a energia elétrica excedente é maior do que zero (E_{exc,an} > 0). O montante total anual de eletricidade gerada pelo sistema fotovoltaico (E_{-ca,an} = E_{-ca,c,an} + E_{exc,an}) é quase três vezes maior que o consumo total de eletricidade da casa. Desta forma, percebe-se que a energia neto excedente de um edifício superdimensionado pode ser aproveitada para outras estratégias energéticas, tais como para suprir a demanda de outras edificações localizadas nas proximidades ou mesmo exportar o montante de energia excedente para a rede elétrica local utilizando o sistema de compensação de energia com medição ativa bidirecional. O armazenamento da energia excedente em um banco de baterias é uma alternativa que pode ser empregada para aumentar o fator de auto-consumo da edificação. Nestes termos, o gerenciamento do sistema solar FV com estoque de energia (normalmente com a programação do controlador de carga e dos inversores) é capaz de tornar a edificação auto-suficiente em energia, utilizando a rede elétrica nos períodos de baixa irradiância solar ou como alternativa de segurança em caso de falhas no sistema solar fotovoltaico. O custo de produção tornando-se mais vantajoso para a edificação, em virtude da menor dependência da rede elétrica, é capaz de atingir a paridade de rede mais facilmente.





4.5 Retorno sobre investimento

Conforme determinado pela Equação 24 da página 104, o custo unitário de investimento de cada um dos componentes do sistema solar fotovoltaico relativo ao ano de aquisição dos produtos em 2010 está mostrado na Tabela 16.

ltem	Qtd.	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Módulos fotovoltaicos	48	551,00	26.450,00
Inversores	2	6.090,00	15.400,00 ²
Materiais elétricos	-	-	2.060,00 ³
Instalação e	-	-	$13.250,00^4$
Manutenção			
Total	-	-	57.150,00

Tabela 14. Custos do sistema solar fotovoltaico¹.

Notas:

(1) Calculado a partir de referências internacionais do ano de 2010 (1 € = R\$ 2,258).
(2) O custo total dos inversores também inclui o sistema de aquisição dados (sensores, suportes, power injector e sunny web box com custo total de R\$ 3.220,00).
(3) e (4) Custo incluso taxas de ICMS e IPI⁴.

ICMS: Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços. IPI: Imposto Sobre Produtos Industrializados.

Os módulos fotovoltaicos foram adquiridos com um desconto de 50 % como parte de um acordo entre o fabricante e o projeto da casa Ekó com o objetivo de prestar incentivo fiscal à pesquisa e o desenvolvimento de edifícios ecoeficientes no Brasil. Desta forma, o custo total dos módulos foi reduzido para R\$ 13.225,00. Como os módulos fotovoltaicos SPR 230 são de alta eficiência necessita-se de menos área para sua instalação na cobertura e assim considera-se um ganho com a estrutura metálica no qual foram instalados os painéis. Por isso o custo da estrutura metálica não foi quantificado na tabela. Para realizar a estimativa do custo total do investimento do sistema solar fotovoltaico no Brasil, deve ser considerada a incidência de impostos (imposto de importação, IPI, quando for o caso, ICMS, PIS, COFINS), os quais nem sempre ocorrem de forma homogênea sobre todas as parcelas (EPE, 2012). Em termos líquidos, a internalização no Brasil dos custos de investimento em sistema de geração fotovoltaica representa uma taxa de aproximadamente 25 % sobre o custo dos equipamentos e serviços (EPE, 2012). Segundo a NCM 8541.40.32, os impostos de importação sobre os módulos FV e inversores são de 12 % e 14 % respectivamente. A alíquota do Imposto sobre

Produtos Industrializados (IPI) incidentes sobre módulos fotovoltaicos é nula, conforme indica a Tabela de Incidência do Imposto sobre Produtos Industrializados (TIPI). Há, entretanto, incidência da alíquota de IPI de 15 % sobre os inversores importados (ABINEE, 2012). No sistema fotovoltaico em estudo, são consideradas no balanço do investimento as taxas de importação dos módulos fotovoltaicos, inversores e dos componentes do sistema de aquisição de dados. Já relacionados aos custos de mão-de-obra e de materiais elétricos, a taxa considera os impostos e tributos nacionais como ICMS e IPI. A Tabela 17 e a Tabela 18 mostram, respectivamente, os custos em impostos e tributos associados aos módulos fotovoltaicos e inversores. O Proforma Invoice indicado nas duas tabelas é o mesmo que uma fatura comercial, que, quando utilizado no comércio internacional, representa os detalhes de uma venda internacional às autoridades aduaneiras.

Impostos e Tributos	Custo (R\$)
Proforma Invoice	29.046,00
Tar. Pgto Antec. Import.	180,00
Tar. Uso de Swift	29,00
Lexco Log. Com. Exterior Ltda	15.390,00
Secretaria Receita Federal IRRF sem	11,25
Lexco	
Porto Seguro Cia de Seguros gerais	150,00
Secretaria Receita Federal CSLL, Cofins e	35,00
PIS	
Total	R\$ 44.840,00

Tabela 15. Impostos e tributos dos módulos fotovoltaicos.

Tabela 16. Impostos e tributos dos Inversores.

Imposto	Custo (R\$)
Proforma Invoice	12.180,00
Despesas bancárias	105,00
Armazenagem (2 períodos)	1.200,00
Taxa DAS	646,00
Transporte Rodoviário	800,00
Honorários de Despachante	490,00
Porto Seguro Cia de Seguros	100,00
gerais	
Total	R\$ 15.520,00

O investimento total do sistema e o custo da energia em relação à potência total instalada do sistema de 11,04 kW_p é dado pela Tabela 19. Considerando as taxas e tributos nacionais, o valor do investimento total inicial do sistema é de R\$ 104.300,00, representando um custo de investimento de R\$ 9,4 por Watt pico instalado. A parcela dos custos iniciais do sistema pode ser visualizada na Figura 89. Considerando o desconto, os módulos FV representam 55,7 % do custo total do sistema. Os inversores representam a segunda maior parcela de custos (29,7 %). Esta parcela encontra-se acima da média de custos dos inversores em sistemas fotovoltaicos em razão das elevadas taxas de importação.

Item	Custo total (R\$)	Custo da energia (R\$/W _p)
Módulos fotovoltaicos	58.065,00 ¹	5,25
Inversores	30.920,00	2,8
Materiais elétricos	2.060,00	0,18
Instalação e Manutenção	13.245,00	1,2
Total	104.290,00	9,4

Tabela 17. Custo total do sistema com impostos e custo da energia.

Notas:

(1) Considerando desconto de 50 % no valor dos módulos fotovoltaicos.



Figura 89. Investimento inicial do sistema solar fotovoltaico.

O cálculo da energia elétrica total anual produzida pelo sistema foi simulado no programa EnergyPlus sob as condições climáticas de Madri e de São Paulo para efeito de comparação. Conforme determinaram as simulações, a energia elétrica total anual produzida em Madri é de 18,80 MWh. Assim, o fator de capacidade calculado do sistema é de aproximadamente 17 %. Já em São Paulo, a produção anual simulada é de 15,95 MWh, correspondendo a um fator de capacidade de 16 %.

A Tabela 20 fornece os resultados do custo de produção sob diferentes cenários de fator de capacidade e sob diferentes porcentagens de retorno de capital anual em relação ao investimento inicial do sistema. Os seguintes parâmetros foram utilizados na análise do custo da produção:

- Vida útil do sistema: 25 anos;
- Custo de O & M: estimado como sendo de 1 % ao ano;

• Decaimento da produtividade originado pela perda de eficiência das células solares: estimado como sendo de -1 % ao ano.

Y _F	Fator de	Retorno de capital anual				
(kWh/kW _p)	Capacidade	6%	7%	8%	9%	10%
1314	15%	0,69	0,75	0,77	0,81	0,87
1402	16%	0,65	0,70	0,72	0,76	0,81
1489	17%	0,61	0,66	0,68	0,71	0,76

Tabela 18. Custo de produção de energia do sistema solar FV (R\$/kWh).

Da tabela 20, percebe-se que o custo de produção de energia é de 0,65 R\$/kWh com a instalação sendo mantida em São Paulo, com fator de capacidade de 16 % e taxa de retorno de 6 % ao ano. Este valor é da ordem de grandeza da tarifa de energia de clientes residenciais de diversas concessionárias no Brasil, incluídos os impostos e encargos (ABINEE, 2012). O custo de produção para Madri é de 0,61 R\$/kWh considerando a mesma taxa de retorno de 6 %. A paridade de rede é atingida quando o custo de produção da energia fotovoltaica é comparado com o custo da tarifa de eletricidade da rede elétrica com geração convencional. Levando em consideração o estado de arte da tecnologia FV e os incentivos governamentais para as energias renováveis, a paridade de rede tem sido empregada em locais específicos. Porém, com os custos dos módulos FV em declínio e os preços das tarifas das concessionárias escalonando com a adoção das tarifas premium, a energia solar FV deverá se tornar mais vantajosa nos próximos anos (BRANKER et al., 2011).

Para determinar o tempo do retorno do investimento (R_I) foi aplicado um método de financiamento tipo SAC (Sistema de Amortização Constante). Neste sistema a parte da amortização é constante em todas as parcelas. Isso significa, portanto, que o saldo devedor é reduzido mês a mês de um valor constante (WINFINANCE, 2012). À medida que o tempo passa e a dívida vai sendo amortizada, o valor a ser pago referente aos juros sobre o saldo devedor também diminui.

Os dados para o cálculo das parcelas financiadas pelo SAC da Tabela 22 são fornecidos pela Tabela 21. Foi considerada a tarifa de energia de São Paulo referente ao ano de 2012, e juros de financiamento de 12 % ao ano. Com um período de financiamento de 10 anos, com 10 % do investimento total financiado, o tempo de retorno do investimento com financiamento SAC será de 17 anos, considerando o fator de capacidade do sistema operando em São Paulo. Considerando o fator de capacidade de 15 % tomada como referência nacional, o tempo do retorno do investimento será de 18 anos.

O financiamento do sistema pode ser aplicado nos casos em que a TIR seja maior que os juros do financiamento, caso contrário o investidor terá um balanço de retorno interno negativo. O TIR calculado conforme dados da Tabela 16 é de 5 % ao ano.

Tabela 19. Dados de financiamento	SAC	(São	Paulo).
-----------------------------------	-----	------	---------

Investimento Inicial (R\$)	104.300,00
Potência Instalada (kWp)	11,04
Vida útil	25
O&M (%)	1
Tarifa kWh (R\$/kWh)	0,40
Evolução da Tarifa kWh (%)	4
Decaimento produtividade (%)	-1
Período Financiamento (anos)	10
Juros Financiamento (%)	12%

Tabela 20. Retorno do investimento e taxa do retorno do investimento com financiamento SAC.

Ano/FC	16%
0	-R\$ 93.870,00
1	R\$ 2.850,00
2	R\$ 3.160,00
3	R\$ 3.475,00
4	R\$ 3.795,00
5	R\$ 4.118,50
25	R\$ 11.422,00
TIR	5%

Uma análise econômica do sistema solar FV para o ano atual foi investigada a fim de comparar o custo total de investimento e o tempo de retorno do investimento em relação ao ano de aquisição dos materiais (2010). Nesta análise, o custo de energia dos módulos fotovoltaicos e inversores foram referenciados comparando com o custo de um sistema solar FV brasileiro, típico do ano de 2013. Este sistema possui módulos FV de mesma tecnologia dos módulos FV da casa Ekó (m-Si) e inversores de mesma capacidade (5 kW). Os custos de investimento dos componentes do sistema solar fotovoltaico assim como os custos da energia relativa ao ano atual são

apresentados pela Tabela 23. O custo dos módulos FV é fornecido com acréscimo de impostos de PIS (1,65 %), COFINS (7,6 %) e isento de taxa de importação (IPI) e ICMS. Já o custo dos inversores é acrescido de impostos PIS (1,65 %), COFINS (7,6 %), ICMS (12 %) e IPI (15 %). O custo do sistema de aquisição de dados é acrescido no custo total dos inversores. Conforme indicado na tabela, o custo de investimento é de 2,5 R\$/W_p para os 48 módulos FV da residência e de 1,99 R\$/W_p para os dois inversores FV e o sistema de aquisição de dados. O custo do investimento para os materiais elétricos e para instalação e manutenção foi referenciado conforme o ano de 2010. Considerando as taxas e tributos nacionais, o valor do investimento total do sistema é de R\$ 64.900,00, representando um custo de investimento de R\$ 5,87 por Watt pico instalado. Considerando o desconto de 50 % no custo total dos módulos no ano de 2010 e os impostos, observa-se que o custo dos módulos FV é 35,5 % superior em comparação ao final do ano de 2012. Sem o desconto nos módulos FV o custo é 44 % superior. No caso dos inversores FV, entre 2010 ao final de 2012, considerando os impostos, o custo é 17 % maior. A diferença de custos do sistema solar FV entre o ano de 2010 e o final do ano de 2012 considerando o desconto de 50 % nos módulos é de 23 %. Sem considerar o desconto nos módulos esta diferença é de 29 %.

ltem	Qtd.	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)	Custo da energia (R\$/W _p)
Módulos fotovoltaicos	48	575,00	27.600	2,5
Inversores	2	9.384,00	21.988,00 ¹	1,99
Materiais elétricos	-	-	2.060,00 ²	0,18
Instalação e	-	-	13.250,00 ³	1,2
Manutenção				
Total	-	-	64.900,00	5,87

Tabela 21. Custos do sistema solar fotovoltaico e custo da energia para o ano atual.

Notas:

(1) O custo total dos inversores com sistema de aquisição dados (sensores, suportes, power injector e sunny web box com custo total de R\$ 3.220,00).

(2) e (3) Custo incluso taxas de ICMS e IPI.

Considerando os dados de financiamento SAC para São Paulo da Tabela 21, com investimento inicial de R\$ 64.900, 10 % do investimento total financiado e fator de capacidade do sistema operando em São Paulo, o tempo de retorno do investimento será de 11 anos com taxa interna de retorno de 10 % ao ano. Considerando o fator de capacidade de 15 % tomada como referência nacional,

o tempo do retorno do investimento será de 12 anos com TIR de 9 % ao ano. Com 50 % do investimento total financiado e o sistema operando em São Paulo, o tempo de retorno do investimento será de 13 anos com taxa interna de retorno de 10 % ao ano.

5. Conclusões finais e discussões

Este trabalho apresentou análises experimentais e de simulações de uma edificação à energia neto positiva localizada em Madri, Espanha. Através do estudo proposto, foi possível caracterizar o sistema solar fotovoltaico da edificação, identificando os geradores fotovoltaicos e sua integração na cobertura, os inversores fotovoltaicos e o sistema de proteção elétrica e de aterramento. Através da aquisição de dados medidos na edificação, desenvolveu-se uma análise das variáveis do sistema solar FV e da estação solarimétrica. As interações entre o sistema solar FV, a rede elétrica e a carga foram investigadas através da distribuição de energia elétrica diária, relacionando o consumo de eletricidade da casa com a produção de energia e a troca de energia com a rede elétrica. Foi possível caracterizar o perfil de consumo de sclasses de cargas elétricas presentes na casa.

As variáveis climáticas caracterizaram a operação do sistema em clima mediterrâneo continental. Verificou-se uma diferença de irradiação solar de 20 % entre o dia de maior geração solar FV e o dia de menor geração no período das medições. Através da análise do efeito da temperatura de operação dos geradores sobre a eficiência de conversão fotovoltaica, verificou-se uma diminuição da eficiência do gerador com o aumento da temperatura de operação (T_{mod}). Esta redução implica na modificação do desempenho global do sistema assim como o efeito da temperatura pode causar a degradação dos módulos FV. Foi verificado que os módulos fotovoltaicos podem atingir uma temperatura máxima de 61°C, sendo esta temperatura 30 % superior à temperatura máxima ambiente.

As plantas fotovoltaicas podem ser construídas mais rapidamente do que plantas convencionais em virtude da facilidade de instalação dos módulos FV em edificações ou em usinas solares. Além disso, a geração solar FV não consome combustíveis fósseis presentes na natureza e não emite nenhum tipo de poluente para a atmosfera durante sua operação enquanto gera eletricidade silenciosamente. No entanto, a energia solar FV possui uma série de limitações que fazem desta tecnologia ainda pouco explorada guando comparada com outras fontes de geração de energia. Os custos de produção de energia de sistemas FVs são ainda maiores daqueles em que são gerados por plantas convencionais, como a geração hidroelétrica, por exemplo, em virtude, sobretudo, pelo alto custo de fabricação da tecnologia fotovoltaica. Todavia, estimulada pela redução anual do custo dos módulos FV, os edifícios eficientes são capazes de atingir mais facilmente a paridade de rede já que demandam menos energia da rede elétrica, compensado pela sua eficiência energética, pelo qual torna os custos de produção mais competitivos em relação à tarifa da concessionária de energia. No contexto das atuais regulamentações em muitos

países, a paridade de rede vem se tornando uma realidade, na medida em que há uma menor dependência da rede elétrica. O ano de 2010 foi caracterizado pelo grande aumento dos eventos de paridade de rede em várias regiões do globo (BREYER & GERLACH, 2013). A paridade de rede deverá ocorrer mais intensamente nas próximas décadas na maioria dos segmentos de mercado no mundo, iniciando por regiões com boas condições solares e com altas tarifas de eletricidade, pelo qual a tecnologia FV torna-se mais importante, estimulando o mercado FV. Assim, a redução no custo de produção fotovoltaica, juntamente com a paridade de rede, podem estabelecer novos modelos de negócios para a indústria FV.

Em termos de infraestrutura de sistemas solares FVs, as avaliações dos critérios estabelecidos no monitoramento dos dados de operação fornecem uma oportunidade de melhoria na capacidade de produção com a identificação de falhas e anomalias que podem ocorrer no sistema. Estes critérios podem ser avaliados mensalmente através da análise do PR e da produtividade fotovoltaica, e paralelamente, os sensores da estação solarimétrica podem fornecer informações sobre o estado do clima que determina a geração solar FV, desde que as variações climáticas podem afetar a disponibilidade do recurso solar. Quando modelos físicos são aplicados, é possível avaliar a relação entre os vários componentes das edificações, suas estratégias de controle e manutenção e as condições climáticas. Além disso, o controle e o monitoramento de um EENP são estratégias que devem ser aplicadas a fim de melhorar a relação entre geração e consumo de eletricidade sob condições dinâmicas em tempo real (KOLOKOTSA et al., 2010).

As análises experimentais do balanço de energia elétrica mostraram que a produção de energia é suficiente para abastecer a casa durante todo o período considerado. Foi verificado que a geração solar fotovoltaica é capaz de suprir o consumo de eletricidade da casa nos períodos mais importantes do dia, porém a casa depende inteiramente da rede elétrica nos períodos de baixa irradiância solar e durante a noite. A rede elétrica além de funcionar como um elemento de estoque para o sistema solar FV é também uma alternativa de segurança em caso de ocorrências de falhas no sistema.

Um EENP foi definido como um edifício que produz mais energia do que consome anualmente sob a condição da energia excedente anual ser positiva. A metodologia de cálculo apresentada neste estudo possibilitou classificar a edificação com maior precisão, já que se trabalhou sobre o balanço energético anual. Foi determinado que o montante de energia produzida pelo sistema solar FV é superior ao montante de consumo de eletricidade em todas as estações do ano, sendo que o balanço neto total anual é de aproximadamente 12 MWh. Nestes aspectos, percebe-se que a edificação apresenta a energia anual excedente muito superior ao que deveria possuir para atender a demanda de eletricidade da casa o que eleva os custos da edificação sem esta necessidade adicional. Desta forma, estratégias para melhorar o índice de

correlação entre geração e consumo devem ser estudadas. A redução da capacidade instalada do sistema solar FV juntamente com gestão energética com estoque de energia poderá não somente ser mais econômico para a residência como também deverá aumentar a capacidade de auto-consumo. Esta solução poderá tornar o custo de produção de energia mais competitivo, tornando a paridade de rede uma realidade na medida em que a edificação se tornar cada vez menos dependente da energia da rede elétrica. O gerenciamento da energia para o auto-consumo deve abordar a mudança da rotina diária, deslocando o período de utilização das cargas elétricas mais importantes em termos de consumo de energia, para os períodos de produção solar. Todavia, estas práticas de auto-consumo determinam mudanças no comportamento dos usuários e por isso devem considerar o perfil dos consumidores e suas atividades diárias. Um sistema automatizado pode ser uma alternativa, pelo qual pode programar as atividades diárias exercidas automaticamente. Além disso, um sistema automatizado pode fornecer informações ao usuário a respeito da potência elétrica consumida e produzida e do balanço energético global da edificação para melhor aproveitamento do recurso solar.

Comparando os cenários de desempenho de energia elétrica entre edificações do SDE, verificou-se a diferença entre o perfil de geração solar FV e a produtividade fotovoltaica. Foi verificado que as edificações com um bom nível de eficiência energética e com a curva de consumo correspondendo aos períodos de geração solar apresentaram a melhor correlação temporal entre geração e consumo. O índice de correlação temporal serve como uma importante estratégia de gerenciamento de energia, reduzindo o transporte de eletricidade e encorajando o usuário a controlar o fluxo de energia. Além disso, o uso desta técnica deverá ser uma estratégia importante no futuro das redes inteligentes, auxiliando na garantia do suprimento de energia e reduzindo o uso dos recursos naturais primários (CASTILLO-CAGIGAL et al., 2011).

No nível de simulações computacionais, foi possível verificar cenários de operação da casa, desde a previsão de consumo dos sistemas elétricos da casa até a operação do sistema solar FV. Através das simulações foi possível determinar o balanço de energia elétrica diária e assim compará-lo com os dados experimentais obtidos durante a operação da casa. As aproximações entre os valores medidos e simulados com a reta linear mostraram as disparidade entre os resultados. O efeito da cidade no microclima ocasionado pela distância entre a edificação e a estação climática que forneceu os dados meteorológicos para o arquivo climático TMY2 de Madri é um fator que pode influenciar na disparidade entre as medições do sistema de aquisição de dados da edificação e as simulações no EnergyPlus. Além disso, a precisão dos sensores e a correta calibração são fatores que podem determinar diferenças de radiação solar medida e simulada.

Como trabalho futuro espera-se que este estudo possibilite uma análise comparativa entre os dados de desempenho energético da edificação em Madri com dados coletados no Brasil. Com isso, será possível estudar o desempenho do sistema solar FV e de eficiência energética da casa no Brasil, encontrando soluções mais eficazes para a construção de edifícios eco-eficientes no país. Outros tipos de análises de simulações no EnergyPlus podem oferecer formas de estudo mais detalhadas de eficiência energética tais como nas simulações de iluminação e ventilação natural, simulações do sistema solar térmico, propondo alternativas de redução do consumo em aquecimento de água, como na proposta de um piso radiante com aquecimento solar. As simulações envolvendo a envoltória da edificação como na mudança da área das portas e janelas e a orientação solar das fachadas podem fornecer propostas de redução no consumo anual de aquecimento e resfriamento. Por outro lado, os estudos da análise de custo do ciclo de vida da edificação e da análise de custo efetivo das reduções de consumo de energia primária e das reduções de emissões de CO₂ para atmosfera são técnicas que podem ser aplicadas nas simulações para determinar as diferenças entre uma edificação com geração de eletricidade com energia solar e uma edificação convencional. Também é possível comparar os dados das simulações com outros programas computacionais a fim de verificar a compatibilidade de resultados. Existe a possibilidade de testar outros tipos de arquivos climáticos para diferentes localidades verificando o desempenho da edificação em outras condições climáticas.

Referências Bibliográficas

ABINEE. Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. **Proposta para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira**. Preparado pelo Grupo Setorial de Sistemas Fotovoltaicos da ABINEE. Junho de 2012.

ABNT. NBR 10898 Energia solar fotovoltaica – Terminologia. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2006.

AL-AJMI, F. F., HANDY, V. I. Simulation of energy consumption for Kuwaiti domestic buildings. Energy and Buildings, v. 40, p. 1101-1109, 2008.

ALMEIDA, M. P. **Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. Dissertação Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energia. EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo. 171 p. 2012.

ALRASHED, F. M. ASIF, **Prospects of Renewable Energy to Promote Zero Energy Residential Buildings in the KSA**. Energy Procedia, v. 18(0), p. 1096-1105, 2012.

AYOMPE, L.M. et al. **Measured performance of 1.72 kW rooftop grid connected photovoltaic system in Ireland**. Energy Conversion and Management, v. 52(2), p. 816-825, 2010.

BARKER, G. NORTON, P. **Predicting Long-Term Performance of Photovoltaic Arrays Using Short-Term Test Data and an Annual Simulation Tool**. NREL Conference Paper, p. 550-3601, 2003.

BAMBROOK, S.M., A.B. SPROUL. D. JACOB. **Design optimization for a low energy home in Sydney**. Energy and Buildings, v. 43(7), p. 1702-1711, 2011.

BEN. Balanço Energético Nacional 2012: Ano base 2011. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, EPE, 2012.

BOJIĆ, M., NIKOLIĆ, N., NIKOLIĆ, D., SKERLIĆ, J. & MILETIĆ, I. **Toward a positive-net-energy residential building in serbian conditions**. Applied Energy, v. 88(7), p. 2407-2419, 2011.

BRANCO, Anísio Costa Castelo. **Matemática Financeira Aplicada**. São Paulo: Thomson-Pioneira, 2002.

BRANKER, K., PATHAK, M. J., PEARCE, J. M. **A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity**. Renewable and Sustainable Energy Review, v. 15(9), p. 4470-4482, 2011.

BREYER, C., GERLACH, A. **Global overview on grid-parity**. Progress in Photovoltaic, v. 21, p. 121-136, 2013.

CARLO, J. C., LAMBERTS, R. **Processamento de arquivos climáticos para simulação do desempenho energético de edificações**. Relatório LabEEE200504, 27p, 2005.

CASTILLO-CAGIGAL, M., CAAMANÕ-MARTÍN, E., MATALLANAS, E., MASA-BOTE, D., GUTIÉRREZ, A., MONASTERIO-HUELIN, F., JIMÉNEZ-LEUBE, J. **PV self-consumption optimization with storage and Active DSM for the residential sector**. Solar Energy, v. 85, p. 2338-2348, 2011.

CEPHEUS. **Cost Efficient Passive Houses as European Standards**. Disponível em : http://www.cepheus.de. Acesso em: 23 de abril 2011.

CHARRON, R. **A review of low and net-zero energy solar home initiatives**. NRCan, Natural Resources Canada, p. 1–8, 2005.

CHENG C. L., CHAN C. Y., CHEN C. L. Empirical approach to BIPV evaluation of solar irradiation for building applications. Renewable Energy, v. 30, p. 1055-1074, 2005.

CHOUDHARY, R., AUGENBROE, G., GENTRY, R., HU, H. **Simulation-Enhanced Prototyping of an Experimental Solar House.** Building Simulation, v. 1, p. 336–355, 2008.

CRAWLEY, D. B., L. K. LAWRIE, et al. **EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program**. Energy and Buildings, v. 33(4), p. 319-331, 2001.

DENG, S., DALIBARD, A., MARTIN, M., DAI, Y. J., EICKER, U., WANG, R.Z. **Energy supply concepts for zero energy residential buildings in humid and dry climate**. Energy conversion and management, v. 52, p. 2455-2460, 2011.

DGS LV Berlin BRB. The German Energy Society (Deutsche Gesellshaft fur Sonnenenergie). **Planning and installing photovoltaic systems. A guide for installers, architects and engineers**. Segunda edição, 2008.

DIDONE, E. L., PEREIRA, F. O. R. **Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 139-154, 2010.

DOE. U.S. Department of Energy. **Zero Net Energy Buildings Outreach and Action Plan**. http://www.eere.energy.gov/solarbuildings/pdfs/zne.pdf Acesso em 01 outubro 2004.

DOE. U.S. Department of Energy. Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_sources.cfm#S WEC. Acesso em: 13 julho 2012.

DOE. U.S. Department of Energy. **Energy Basics**. Disponível em: http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/pv_cell_conversion_effici ency.html. Acesso em: 30 janeiro 2013.

EGEC. European Geothermal Energy Council. Ground Source Heat Pump: A Guide Book. An action for the promotion and the dissemination of successful technologies in the ground source heat pump (GSHP) field. Bruxelas, 2008.

ELKINTON, M.R., J.G. MCGOWAN. J.F. MANWELL. **Wind power systems for zero net energy housing in the United States**. Renewable Energy, v. 34(5), p. 1270-1278, 2009.

EnergyPlus Enginnering Reference. **Referência para cálculos no programa EnergyPlus versão 6.0**. Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkely: LBL: 2001.

EnergyPlusInput-OutputReference.ReferênciaparadadosdeentradaesaídanoEnergyPlusversão6.0.Disponívelem:http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus.Acessoem:abril 2012.

EPA. Environmental Protection Agency. Heat Island Effect U.S. Disponível em: http://pt.wikipedia.org/wiki/Telhado_verde. Acesso em 24 abril 2011.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Análise da inserção da geração solar na matriz energética brasileira**. Rio de Janeiro, Maio de 2012.

EPIA. European Photovoltaic Industry Association. Global Market Outlook for Photovoltaics until 2016. Relatório de Maio de 2012. Disponível em: http://www.epia.org/publications/epiapublications.html. Acesso em: 18 julho 2012.

EUROPEAN PARLIAMENT. Report on the proposal for a directive of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast) (COM(2008)0780-C6-0413/2008-2008/0223(COD)), 2009.

EVANS, D. L. **Simplified method for predicting photovoltaic array output**. Solar Energy, v. 27(6), p. 555-560, 1981.

EVANS, D. L., FLORSCHUETZ, L. W. Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration. Solar Energy, v. 19(3), p. 255-262, 1977.

FRAUNHOFER. Institut für Solare Energiesysteme ISE. Disponível em: http://www.ise.fraunhofer.de/en/news/news-2012/photovoltaic-capacity-in-germany-tops-list-at-30-gigawatt. Acesso em: 20 Março 2013.

FUMO, N., MAGO, P. & LUCK, R. **Methodology to estimate building energy consumption using energyplus benchmark models**. Energy and Buildings, v. 42(12), p. 2331-2337, 2010.

GARDE, F., BENTALEB, D., BASTIDE, A., OTTENWELTER, E., POTHIN, E. **Réalisation d'un bâtiment à énergie positive à l'île de la Réunion: de la phase programme à la conception**. Journée thématique SFT-IBPSA. Première session, 2006..

GRIFFITH, B.T., ELLIS, P. G. Photovoltaic and Solar Thermal modeling with the EnergyPlus calculation engine. NREL Conference Paper, p. 550-36275. 2004.

HENNINGER, R. H., WITTE, M. J., CRAWLEY, D. B. Analytical and comparative testing of energyplus using IEA HVAC BESTEST E100–E200 test suite. Energy and Buildings, v. 36(8), p. 855-863, 2004.

HENDRON, R. Building America performance analysis procedures for existing homes. National Renewable Energy Laboratory. Disponível em: http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/38238.pdf. Acesso em agosto 2012.

HERNANDEZ, P., KENNY, P. From net energy to zero energy buildings: **Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB)**. Energy and Buildings, v. 42, p. 815-821, 2010.

IDAE. Instituto para la diversificatión y ahorro de la energía. **Guia práctica de la energía – consumo eficiente y responsable**. Terceira edição. Julho de 2011.

IEA. International Energy Agency. **Community-Scale Solar Photovoltaics: Housing and Public Development Examples**. Photovoltaic Power Systems Programme, 2008.

IEA. International Energy Agency.CO2 emissions from fuel combustion ehighlights.Ediçãode2012.Disponívelem:http://www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf.Acesso em: Agosto 2012.

IEA. International Energy Agency. World Energy Outlook. OECD, Paris, 2010.

IEA. International Energy Agency. Key World Energy Statistics, 2012.

IEC 61724. Photovoltaic system performance monitoring – guidelines for measurement, data Exchange and analysis. Edição 1.0, v. 04, 1998.

JABER, S., AJIB, S. **Optimum, technical and energy efficiency design of residential building in Medi**terra**nean region**. Energy and Buildings, v. 43, p. 1829–1834, 2011.

JONES, A. D., UNDERWOOD, C. P. **A thermal model for photovoltaic** systems. Solar Energy, v. 70, p. 349 - 359, 2001.

KING, D. L. Photovoltaic Module and Array Performance Characterization Methods for All System Operating Conditions. Sandia National Laboratories. Albuquerque, NM 87185, 1996.

KING, D. L., BOYSON, W. E., KRATOCHVIL J. A. **Photovoltaic Array Performance Model**. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185, Novembro de 2003.

KOLOKOTSA, D., ROVAS, D., KOSMATOPOULOS, E. & KALAITZAKIS, K. **A** roadmap towards intelligent net zero- and positive-energy buildings. Solar Energy, v. 85(12), p. 3067-3084, 2011.

KÓS, J. R.; FAGUNDES, T. C. **Sistemas mais sustentáveis para a automação e informação residencial**. São Carlos, n. 5, junho 2011. Disponível em: www.nomads.usp.br/virus/virus05/?sec=4&item=5&lang=pt. Acesso em: 18 Julho 2012.

KRÜGER, E. L., LAMBERTS, R. **Avaliação de Desempenho Térmico de Casas Populares.** ENTAC, VIII Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, Salvador, 2000.

LAMBERTS, R., WESTPHAL, F. Simulação energética de edificações no programa EnergyPlus utilizando dados das normais climatológicas. Encac-Elacac, p. 2183-2192, 2005.

LAMBERTS, R., GOULART, S., CARLO, J., WESTPHAL, F., PONTES, R. O. **Regulamentação de etiquetagem voluntária de nível de eficiência energética de edifícios comerciais e públicos.** IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. p. 1019-1028, 2007.

LAMBERTS, R., GHISI, E., PEREIRA, C. D., BATISTA, J. O. **Casa eficiente:** simulação computacional do desempenho termo-energético. Florianópolis, UFSC/LabEEE. v. 4, 53 p, 2010.

LAUSTEN, J. Energy Efficiency Requirements in Building Codes, in: Energy Efficiency Policies for New Buildings, OECD/IEA, Paris, 2008.

LECKNER, M., ZMEUREANU, R. Life cycle cost and energy analysis of a **Net Zero Energy House with solar combisystem**. Applied Energy, v. 88, p. 232-241, 2011.

LOUTZENHISER, P.G., MANZ, H., FELSMANN, C., STRACHAN, P.A., FRANK, T., MAXWELL, G.M. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. Solar Energy, v. 81, p. 254-267, 2007.

MANIOĞLU, G., YILMAZ, Z. Economic evaluation of the building envelope and operation period of heating system in terms of thermal comfort. Energy and Buildings, v. 38(3), p. 266-272, 2006.

Manual de projeto Ekó House (versão 5). Solar Decathlon Europe. 2012.

MARION, B et al. **Performance parameters for grid-connected PV-Systems**. NREL. IEEE Photovotaics Specialists. 2005.

MARSZAL, A. J., HEISELBERG, P., BOURRELLE, J. S., MUSALL, E., VOSS, K., SARTORI, I., NAPOLITANO, A. **Zero energy building – A overview of definitions and calculations methodologies**. Energy and Buildings, v. 43, p. 971-979, 2011.

MARSZAL, A.J., BOURRELLE, J.S., MUSALL, E., HEISELBERG, P., GUSTAVSEN, A., VOSS, K. Net zero energy buildings – Calculation methodologies versus National Building Codes, in: EuroSun Conference, Graz, Austria, 2010.

MAU, S., JAHN, U. **Performance analysis of grid-connected PV systems**. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exibition. Dresden, Alemanha: (s.n.). 2009.

MEI, L. D.G., INFIELD, R., GOTTSCHALG, D.L., LOVEDAY, D., DAVIES, M., BERRY. Equilibrium thermal characteristics of a building integrated photovoltaic tiled roof. Solar Energy, v. 83, p. 1893–1901, 2009.

MELO, A. P., WESTPHAL, F. S., MATO, M. **Apostila do curso básico do programa EnergyPlus**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE). Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

MILO, A., GAZTAÑAGA, H., ETXEBERRIA-OTADUI, I., BACHA, S., RODRÍGUEZ, P. **Optimal economic exploitation of hydrogen based grid***friendly zero energy buildings*. Renewable Energy, v. 36, p. 197-205, 2011.

MUSALL, E., WEISS, T., VOSS, K., LENOIR, A., DONN, M., CORY, S., GARDE, F. **Net Zero Energy Solar Buildings: An Overview and Analysis on Worldwide Building Projects**. Disponível em: http://www.iea-shc.org/publications/downloads/STC134895.pdf. Acesso em: 28 agosto 2011.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. User's manual for TMY2s and TMY2sm typical meteorological years derived from the 1961-1990. Colorado: NREL, 1995.

NISHIOKA, K., HATAYAMA, T., URAOKA, Y., FUYUKI, T., HAGIHARA, R., WATANABE, M. Field-test analysis of PV system output characteristics focusing on module temperature. Solar Energy Materials & Solar Cells, v. 75, p. 665-671, 2003.

NOTTON, G., CRISTOFARI, C., MATTEI, M., POGGI, P. **Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences**. Applied Thermal Engineering, v. 25(17–18), p. 2854-2877, 2005.

ORDENES, M., MARINOSKI, DL., BRAUN, P., RÜTHER, R. The impact of building-integrated photovoltaics on the energy demand of multi-family dwellings in Brazil. Energy and Buildings, v. 39, p. 629-642, 2007.

PARIDA, B., INIYAN, S., GOIC, R. **A review of solar photovoltaic technologies**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15(3), p. 1625-1636, 2011.

PASSIVHAUSINSTITUT.Disponívelem :http://fr.wikipedia.org/wiki/Habitat_passif. Acesso em 24 abril 2011.

RAMPINELLI, G. A. KRENZINGER, A. Efeito do sombreamento em células de uma associação de módulos fotovoltaicos conectados à rede. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 10, 2006.

REICH, N. et al. **Performance ratio revisited: is PR > 90% realistic?** Progress in Photovoltaics: Research and Applications. Publicado online na Wiley Online Library, 2012.

REIM M, BECK A, KORNER W. **Highly insulating aerogel glazing for solar energy usage**. Solar Energy, v. 72, p. 21-9, 2002.

REPN. Renewable Energy Policy Network for the 21st century. Global Statuts Report, 2012.

RES. Renewable energy sources 2010. Federal Ministry for Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Disponível em: http://www.erneuerbareenergien.de/files/english/pdf/application/pdf/ee_in_zahle n_201_en_bf.pdf. Acesso em: 05 julho 2012.

REUK. Disponível em: http://www.reuk.co.uk/Low-E-Double-Glazing.htm. Acesso em: 16 julho 2012.

RIFFAT, S.B. & QIU, G. A review of state-of-the-art aerogel applications in buildings. Int. J. Low-Carbon Tech. 2012.

RIFFONNEAU, Y., BARRUEL, F., BACHA, S. **Problématique du stockage associé aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau**. Revue des Energies Renouvelables, v. 11, Nº 3, p. 407- 422, 2008.

RORIZ, M. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros**. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. Janeiro de 2012.

RÜTHER, R. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Editora UFSC/LABSOLAR. Florianópolis, 2004.

RÜTHER, R., KNOB P.J., DA SILVA JARDIM, C., REBECHI, SH. **Potential of building integrated photovoltaic solar energy generators in assisting daytime peaking feeders in urban area in Brazil**. Energy conversion and Management, v. 49, p. 1047-1079, 2008.

RÜTHER, R., ZILLES, R. Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil. Energy Policy, v. 39, p. 1027-1030, 2011.

SDE. Solar Decathlon Europe. Rules V.4.0. Março de 2012.

SELLÉ, A. Bibliothèque des matériaux de construction [archive]. Disponível em: Maison.com. Acessado em 28 junho 2011.

SUNPOWER. Catálogo de especificações técnicas do módulo fotovoltaico SPR 230 WHT. 2012.

TASK 40/ANNEX 52. Towards Net Zero Energy Solar Buildings, IEA SHC Task 40 and ECBCS Annex 52, Disponível: http://task40.iea-shc.org/. Acesso em Março 2013.

TORCELLINI, P., PLESS, S., DERU, M., CRAWLEY, D. **Zero Energy Buildings: A critical look at the definition**, in: ACEEE Summer Stud, Pacific Grove, California, USA, 2006.

WANG, L., GWILLIAM, J., JONES, P. Case study of zero energy house design in UK. Energy and Buildings, v. 41, p. 1215-1222, 2009.

WANG, N., ESRAM, T., MARTINEZ, L. A., McCULLEY, M. T. A marketable allelectric solar house: A report of a Solar Decathlon project. Renewable Energy, v. 34, p. 2860-2871, 2009.

WBCSD. World Business Council for Sustainable Development. Disponível em: www.wbcsd.org/. Acesso em 19 de maio de 2011.

WIKIPÉDIA. Disponível em: http://pt.wikipedia.org/wiki/Madrid. Acesso em: 17 julho 2012.

WINFINANCE. Disponível em: http://www.winfinance.com.br/guia/sac.php. Acesso em: 19 agosto 2012.

YEANG, K. The US Solar Decathlon 2007. 4dsocial: interactive design environment: architectural design. V. 77, p.120-121, 2007.

YOO S-H., LEE E-T. Efficiency characteristic of building integrated photovoltaics as a shading device. Building and Environment, v. 37, p. 615-623, 2002.

ZAHEDI, A. Maximizing solar PV energy penetration using energy storage technology. Renewable and sustainable energy reviews, v. 15, p. 866-870, 2011.

ZONDAG, H. A. **Flat-plate pv-thermal collectors and systems: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 12(4), p. 891-959, 2008. 4