



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RENATA IMACULADA SOARES PEREIRA

**REDE DE MONITORAMENTO IOT APLICADA EM PLANTAS DE
MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

FORTALEZA

2018

RENATA IMACULADA SOARES PEREIRA

REDE DE MONITORAMENTO IOT APLICADA EM PLANTAS DE MICROGERAÇÃO
FOTOVOLTAICA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.

Coorientador: Prof. Dr. Sandro César Silveira Jucá.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P495r Pereira, Renata Imaculada Soares.
Rede de monitoramento IoT aplicada em plantas de microgeração fotovoltaica / Renata Imaculada Soares
Pereira. – 2018.
203 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.
Coorientação: Prof. Dr. Sandro César Silveira Jucá.
1. Microgeração Fotovoltaica. 2. Rede de Monitoramento. 3. Internet das Coisas. I. Título.
- CDD 621.3
-

RENATA IMACULADA SOARES PEREIRA

REDE DE MONITORAMENTO IOT APLICADA EM PLANTAS DE MICROGERAÇÃO
FOTOVOLTAICA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Energias Renováveis.

Aprovada em: 03/09/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Sandro César Silveira Jucá (Coorientador)
Instituto Federal do Ceará (IFCE) Campus Maracanaú

Prof. Dr. Douglas Bressan Riffel
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Prof. Dr. Paulo Peixoto Praça
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho
a Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde necessária para trilhar os caminhos do estudo até hoje.

À minha mãe, Fransuir, pelo amor e dedicação desde o momento em que soube que eu estava chegando.

Ao meu pai, Almir, pelo esforço em trabalhar para cuidar de nossa família e por promover a união em nosso lar.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho, por acreditar no sucesso desta pesquisa e dedicar seu tempo e seus valiosos conhecimentos.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Sandro César Silveira Jucá, que com muita paciência e compreensão, me faz lembrar que sempre devemos valorizar cada momento de nossas vidas e aproveitar o que temos de melhor a oferecer. Suas experiências práticas foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu esposo, Felipe Costa, pela ajuda nas traduções dos textos e pela companhia e dedicação durante esta pesquisa.

À Lorena de Castro Dantas que tem me ajudado nas pesquisas do LEA e que esteve comigo em Colônia durante nosso intercâmbio. Sempre contribuindo e compartilhando as angústias e as alegrias de uma estadia no exterior, longe de casa e da família.

Ao Laboratório de Energias Alternativas (LEA) da UFC pela disponibilidade dos equipamentos; e a todos os alunos do LEA, que estão sempre por perto muito participativos.

Ao Prof. Dr. Paulo Peixoto Praça e ao Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso do Departamento de Engenharia Elétrica da UFC e ao Prof. Dr. Douglas Bressan Riffel da Universidade Federal de Sergipe (UFS), que participaram da defesa desta tese e que contribuíram significativamente na evolução deste trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Ceará (UFC) pelos ensinamentos durante as disciplinas cursadas e à UFC por promover o incentivo à Pesquisa e à Pós-Graduação.

Ao programa conjunto CAPES-DAAD pela concessão da bolsa de doutorado sanduíche na Alemanha. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Ao DAAD pelo financiamento do curso de alemão realizado na Alemanha e pelos auxílios financeiros durante a bolsa de doutorado sanduíche.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro no âmbito da Chamada Universal 01/2016 – Processo: 420133/2016-0.

Ao Prof. Dr. Ingo Stadler, ao doutorando Sergej Baum e ao grupo de pesquisa do Prof. Klaus Lambers e do doutorando Johannes Rullof da *Technische Hochschule Köln* pela receptividade e acompanhamento durante o intercâmbio em Colônia, Alemanha.

“A mente que se abre a uma nova
ideia, jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

RESUMO

A rede de monitoramento IoT desenvolvida no presente projeto de tese propõe a redução de custos associados ao *hardware* e ao *software* de *dataloggers* e módulos de sensoriamento comerciais, que são importados, de alto custo e com controle e armazenamento de dados via *softwares* proprietários. Adicionalmente, apresentam conexões limitadas de sensores com baixa flexibilidade de expansão, manutenção restritiva ao fabricante, além de longas distâncias de comunicação por cabo. A rede IoT desenvolvida foi implementada e testada em três plantas fotovoltaicas (FV) conectadas à rede: Fortaleza - CE, Maracanaú - CE e Colônia - Alemanha. A rede de monitoramento IoT aplicada em plantas de microgeração FV instaladas em diferentes locais, pode ser considerada como a inovação principal do presente projeto de tese. Os sistemas embarcados IoT propostos são baseados em *software* livre, permitindo a distribuição *online*, uso gratuito e se comunicam com um servidor na Nuvem de forma sem fio via WiFi. O uso de código aberto e multiplataforma (Linux, Windows® e Mac OSX) permite maior interação e acessibilidade ao usuário. A proposta permitiu realizar a programação do ESP 32 de forma remota através de OTA (*over the air*) e armazenar os dados de forma *offline* com uso do SPIFSS (*SPI Flash File System*) em caso de servidor fora do ar ou problema na conexão WiFi. Uma página chamada Web Monitor foi desenvolvida para consulta *online* dos dados e para monitoramento em tempo real das três plantas. O monitoramento de temperatura de módulos FV individuais tem o objetivo de fornecer dados para a análise de eficiência da geração elétrica e para detecção de falhas com relação a sobreaquecimento das células. Dados meteorológicos como irradiância solar, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e velocidade do vento foram também monitorados com o intuito de possibilitar uma análise mais completa sobre o efeito destas variáveis na resposta de temperatura dos módulos. Nos resultados obtidos, a média de irradiância diária de março a julho de 2018 em Fortaleza (4,9 a 5,5 kWh/m²) é maior que em Maracanaú (4,1 a 5,1 kWh/m²), resultando em maior geração elétrica em Fortaleza. O fator de capacidade (FC) da planta de Fortaleza em junho e julho atingiu valores em torno de 21%, com mínimo de 16% em fevereiro, período chuvoso. Em Maracanaú, o máximo FC foi 17,5% em março e o mínimo, 13,8% em maio. A velocidade do vento máxima em Maracanaú foi de 3,4 m/s em julho e em Fortaleza, 0,55 m/s. A máxima temperatura mensal dos módulos FV em Fortaleza chegou a 65°C, enquanto em Maracanaú, 50°C. As medições da temperatura comprovam que a borda do módulo FV apresenta 1,5°C a menos em relação ao centro.

Palavras-chave: Microgeração fotovoltaica. Rede de monitoramento. Internet das Coisas.

ABSTRACT

The IoT monitoring network developed in this thesis project proposes the reduction of costs associated with hardware and software of dataloggers and commercial sensing modules that are imported, have high costs with control and data storage through proprietary software. Additionally, they have limited sensor connections with low expansion flexibility, restrictive maintenance to the manufacturer and long cable communication distances. The developed IoT network was implemented and tested in three photovoltaic (PV) plants grid connected: Fortaleza - CE, Maracanaú - CE and Cologne - Germany. The IoT monitoring network applied to PV microgeneration plants installed in different locations can be considered as the main innovation of this thesis project. The proposed IoT embedded systems are based on free software, allowing online distribution, free usage and communicate with a server in the Cloud wirelessly via WiFi. The use of open source and cross-platform (Linux, Windows® and Mac OSX) allows greater interaction and accessibility to the user. The proposal made it possible to program the ESP 32 remotely through OTA (over the air) and to store the data offline using the SPI Flash File System (SPIFSS) in the case of problems with the server or with WiFi connection. A web page called Web Monitor was developed for online data consultation and for real-time monitoring of the three plants. The temperature monitoring of individual PV modules has the objective of providing data for the analysis of electric generation efficiency and for failure detection in relation to the overheating of the PV cells. Meteorological data such as solar irradiance, ambient temperature, relative humidity and wind speed were also monitored to allow a more complete analysis of the effect of these variables on the temperature response of the modules. In the obtained results it was verified that the average daily irradiance from March to July 2018 in Fortaleza (4.9 to 5.5 kWh/m²) is higher than in Maracanaú (4.1 to 5.1 kWh/m²), resulting in greater electric generation in Fortaleza. The capacity factor (CF) of the plant in Fortaleza in June and July reached values around 21%, with a minimum of 16% in February, rainy season. In Maracanaú, the maximum FC was 17.5% in March and the lowest, 13.8% in May. The maximum wind speed in Maracanaú was 3.4 m/s in July and in Fortaleza, 0.55 m/s. The maximum monthly temperature of the PV modules in Fortaleza reached 65°C, while in Maracanaú, 50°C. Temperature measurements show that the edge of the PV module is 1.5°C below the center.

Keywords: Photovoltaic Microgeneration. Monitoring network. Internet of Things.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquemático de um sistema de geração FV conectado à rede.....	25
Figura 2 – Perdas na geração da célula FV de silício por cm ² em células comerciais e entre parênteses para testes em laboratório	27
Figura 3 – Resumo das características dos DATS descritos na Tabela 2.....	38
Figura 4 – Perfil PaaS proposto e estrutura do REMS	40
Figura 5 – Conexão serial entre ADCES (SanUSB board) (a) e RPi (b)	42
Figura 6 – Atualização remota de <i>firmware</i> e <i>scripts</i>	43
Figura 7 – Sensores implementados no REMS	45
Figura 8 – Diagrama geral do REMS	47
Figura 9 – Atualização remota via Nuvem.....	49
Figura 10 – Fluxograma de verificação.....	50
Figura 11 – Menu principal do Web Monitor	51
Figura 12 – Menu Principal do Web Monitor	52
Figura 13 – Rede de monitoramento IoT desenvolvida	59
Figura 14 – Monitoramento IoT de Colônia – Alemanha	61
Figura 15 – Módulos FV de Colônia utilizados para monitoramento de temperatura	61
Figura 16 – Sensores PT100 conectados ao módulo IoT ESP 32	62
Figura 17 – PT100 fixado ao módulo FV	62
Figura 18 – Especificações dos cinco módulos FV de Colônia	63
Figura 19 – Caixa de alimentação do sistema IoT	64
Figura 20 – Cabos dos sensores PT 100, fonte do sistema e versão final do sistema.....	65
Figura 21 – Sistema FV de 1,5 kW; primeiro sistema FV conectado à rede da UFC.....	66
Figura 22 – Inversor nacional PHB 1,5 kW e caixa de proteção <i>String Box</i>	67
Figura 23 – Conexão dos PT100 aos módulos FV do LEA e anemômetro no plano inclinado	67
Figura 24 – Anemômetro e piranômetro no plano inclinado.....	68
Figura 25 – Piranômetro horizontal.....	69
Figura 26 – Sensor de temperatura ambiente	69
Figura 27 – ESP 32 da planta de Fortaleza.....	70
Figura 28 – Diagrama ilustrativo da planta de Fortaleza – CE	70
Figura 29 – Medidor de irradiância Solar-100	71
Figura 30 – Câmera térmica FLIR ONE	71

Figura 31 – Validação de temperatura do sensor PT100 com câmera térmica	72
Figura 32 – Diagrama ilustrativo da planta de Maracanaú - CE	73
Figura 33 – Planta FV de Maracanaú	73
Figura 34 – Instalação da planta FV no IFCE – Campus Maracanaú	74
Figura 35 – Piranômetro inclinado da planta de Maracanaú	74
Figura 36 – Anemômetro NRG #40C para medição da velocidade do vento	75
Figura 37 – Interface <i>online</i> da estação meteorológica LONOBX.....	75
Figura 38 – PT100 para medição de temperatura dos módulos FV de Maracanaú.....	76
Figura 39 – Inversor FV, <i>String Box</i> e ESP 32 da planta de Maracanaú.....	76
Figura 40 – Inversor FV e <i>string box</i> da planta de Maracanaú	80
Figura 41 – Esquemático elétrico da <i>string box</i> monofásica.....	81
Figura 42 – Tamanho da placa de desenvolvimento ESP 32 comparado com cartão de identificação.....	82
Figura 43 – Pinos do ESP 32 dev kit.....	83
Figura 44 – Diagrama de blocos interno do ESP 32.	84
Figura 45 – Desenvolvimento de projeto com ESP 32.....	85
Figura 46 – Formas de conexão do PT100.....	87
Figura 47 – Circuitos de condicionamento de sinal e de amplificação do PT100.....	88
Figura 48 – Tensão mínima de saída do circuito PT100	88
Figura 49 – Tensão máxima de saída do circuito PT100	89
Figura 50 – Circuito Multiplexador 8 canais AD com CI 74HC4051	89
Figura 51 – Esquemático final do circuito PT100.....	90
Figura 52 – Esquemático da placa de circuito impresso PT100 e ESP 32 no KiCAD.....	91
Figura 53 – PCI do ESP 32 com componentes soldados.....	91
Figura 54 – Piranômetro inclinado instalado na planta de Fortaleza – LEA-UFC.....	92
Figura 55 – Condicionamento do piranômetro para mínima tensão de saída	93
Figura 56 – Condicionamento do piranômetro para máxima tensão de saída.....	93
Figura 57 – Pinos do pré-amplificador de baixo ruído conectado ao AD do ESP 32	95
Figura 58 – Configurando OTA via “ <i>make menuconfig</i> ”	100
Figura 59 – Tela de programação do ESP 32 no Eclipse	103
Figura 60 – Fluxograma do código programado no ESP 32	104
Figura 61 – Definição das unidades de medida das variáveis	107
Figura 62 – Conexão do ESP 32 à rede WiFi.....	108
Figura 63 – Diagrama de blocos do ESP 8266.....	109

Figura 64 – Pinos da placa de desenvolvimento ESP 8266 implementada.....	110
Figura 65 – Módulo sensor DHT11 acoplável ao ESP 8266 Wemos	110
Figura 66 – ESP 8266 e DHT11 implementados	111
Figura 67 – Forma de onda do anemômetro e condições para construção da lógica	113
Figura 68 – Exemplos de forma de onda de saída do anemômetro.....	113
Figura 69 – Fluxograma do código para leitura do anemômetro com ESP 8266.....	114
Figura 70 – Interface SCADA do CLP do LEA.....	116
Figura 71 – Interface com as pastas de trabalho do software Tableau	118
Figura 72 – Cabeçalho das pastas de trabalho com filtros de data	119
Figura 73 – Fluxograma da gravação OTA	174
Figura 74 – Dados da rede WiFi e senha para gravação OTA no projeto de tese proposto...	175
Figura 75 – Processo de gravação OTA (1)	175
Figura 76 – Processo de gravação OTA (2)	176
Figura 77 – Processo de gravação OTA (3)	177
Figura 78 – ESP 32 conectado ao modem WiFi.....	177
Figura 79 – Inicialização do ESP 32 no monitor serial do Eclipse	183
Figura 80 – Planta PVT de Colônia em setembro de 2017	201
Figura 81 – Estrutura de camadas do módulo PVT-direto	202
Figura 82 – Desenho 3D da planta PVT.....	203

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Tensão, corrente e potência FV em 18/09/16.....	52
Gráfico 2 – Gráficos gerados no Web Monitor de 24 a 29 de agosto de 2016.....	54
Gráfico 3 – Temperatura módulo FV no Web Monitor de 24 a 29 de agosto de 2016.....	54
Gráfico 4 – Gráficos gerados no Web Monitor de 01 a 07 de novembro e dezembro de 2016	55
Gráfico 5 – Tensão FV e Irradiância para um dia nublado (05/12/16).....	55
Gráfico 6 – Temperatura do módulo FV em janeiro de 2017	56
Gráfico 7 – Linearidade do conversor AD do ESP 32	96
Gráfico 8 – Gráfico de conversão AD 12 bits com atenuação de 11dB - ESP 32.....	98
Gráfico 9 – Energia elétrica mensal gerada pelas plantas de Fortaleza e Maracanaú	120
Gráfico 10 – Produtividade mensal das plantas de Fortaleza e Maracanaú	121
Gráfico 11 – FC mensal das plantas de Fortaleza e Maracanaú.....	122
Gráfico 12 – Irradiação mensal em Fortaleza e Maracanaú	123
Gráfico 13 – Irradiação diária em Fortaleza e Maracanaú	124
Gráfico 14 – TD para as plantas de Fortaleza e Maracanaú.....	124
Gráfico 15 – Geração de energia elétrica diária – março 2018 – Maracanaú	125
Gráfico 16 – Menor potência elétrica em março – 29/03/18 – Maracanaú	126
Gráfico 17 – Irradiância – 29/03/18 – Maracanaú.....	126
Gráfico 18 – Temperatura do módulo FV – 29/03/18 – Maracanaú	127
Gráfico 19 – Média potência elétrica em março de 2018 – 25/03/18 – Maracanaú.....	127
Gráfico 20 – Irradiância – 25/03/18 – Maracanaú.....	128
Gráfico 21 – Temperatura do módulo FV – 25/03/18 – Maracanaú	128
Gráfico 22 – Maior potência elétrica em março de 2018 – 20/03/18 – Maracanaú	128
Gráfico 23 – Irradiância – 20/03/18 – Maracanaú.....	129
Gráfico 24 – Geração de energia elétrica diária – maio 2018 – Maracanaú	129
Gráfico 25 – Menor potência elétrica em maio de 2018 – 10/05/18 – Maracanaú	130
Gráfico 26 – Média potência elétrica em maio de 2018 – 13/05/18 – Maracanaú.....	130
Gráfico 27 – Irradiância – 13/05/18 – Maracanaú.....	131
Gráfico 28 – Temperatura do módulo FV – 13/05/18 – Maracanaú	131
Gráfico 29 – Maior potência elétrica em maio de 2018 – 14/05/18 – Maracanaú	132
Gráfico 30 – Irradiância – 14/05/18 – Maracanaú.....	132
Gráfico 31 – Temperatura dos módulos FV – 14/05/18 – Maracanaú	132

Gráfico 32 – Velocidade do vento – 14/05/18 – Maracanaú.....	133
Gráfico 33 – Geração de energia elétrica diária – julho 2018 – Fortaleza	134
Gráfico 34 – Menor potência elétrica em julho de 2018 – 10/07/18 – Fortaleza	135
Gráfico 35 – Irradiância – 10/07/18 – Fortaleza.....	135
Gráfico 36 – Temperatura do módulo FV – 10/07/18 – Fortaleza	135
Gráfico 37 – Média potência elétrica em julho de 2018 – 03/07/18 – Fortaleza	136
Gráfico 38 – Irradiância – 03/07/18 – Fortaleza.....	136
Gráfico 39 – Temperatura dos módulos FV – 03/07/18 – Fortaleza.....	137
Gráfico 40 – Maior potência elétrica em julho de 2018 – 20/07/18 – Fortaleza.....	137
Gráfico 41 – Irradiância – 20/07/18 – Fortaleza.....	138
Gráfico 42 – Temperatura do módulo FV – 20/07/18 – Fortaleza	138
Gráfico 43 – Geração de energia elétrica diária – fevereiro 2018 – Fortaleza.....	139
Gráfico 44 – Geração de energia elétrica diária – fevereiro 2018 - Maracanaú.....	140
Gráfico 45 – Menor potência elétrica em fevereiro de 2018 – 12/02/18 – Fortaleza.....	140
Gráfico 46 – Irradiância – 12/02/18 – Fortaleza.....	141
Gráfico 47 – Temperatura do módulo FV – 12/02/18 – Fortaleza	141
Gráfico 48 – Média potência elétrica em fevereiro de 2018 – 24/02/18 – Fortaleza	142
Gráfico 49 – Irradiância – 24/02/18 – Fortaleza.....	142
Gráfico 50 – Temperatura do módulo FV – 24/02/18 – Fortaleza	142
Gráfico 51 – Maior potência elétrica em fevereiro de 2018 – 27/02/18 – Fortaleza.....	143
Gráfico 52 – Irradiância – 27/02/18 – Fortaleza.....	143
Gráfico 53 – Temperatura do módulo FV – 27/02/18 – Fortaleza	144
Gráfico 54 – Temperatura na borda e no centro do módulo FV3.....	155
Gráfico 55 – Temperatura na borda dos módulos FV1, FV3 e FV5 em 19/06/18 - Maracanaú	156
Gráfico 56 – Temperatura na borda dos módulos FV1, FV3 e FV5 em 21/06/18 - Maracanaú	156
Gráfico 57 – Temperatura no centro dos módulos FV1, FV3 e FV5 em 21/06/18 - Maracanaú	157
Gráfico 58 – Temperatura no centro e na borda do módulo FV5 em 11/06/18 - Maracanaú	157
Gráfico 59 – Geração de energia elétrica diária – março 2018 - Fortaleza.....	185
Gráfico 60 – Menor potência elétrica em março de 2018 – 01/03/18 – 2,6 kWh – Fortaleza	186
Gráfico 61 – Temperatura do módulo FV – 01/03/18 – Fortaleza	186
Gráfico 62 – Média potência elétrica em março de 2018 – 11/03/18 – 7,3 kWh – Fortaleza	186

Gráfico 63 - Temperatura do módulo FV – 11/03/18 – Fortaleza.....	187
Gráfico 64 – Maior potência elétrica em março de 2018 – 03/03/18 – 9,2 kWh – Fortaleza	187
Gráfico 65 – Irradiância – 03/03/18 – Fortaleza.....	187
Gráfico 66 - Temperatura do módulo FV – 03/03/18 – Fortaleza.....	188
Gráfico 67 – Geração de energia elétrica diária – maio 2018 – Fortaleza	189
Gráfico 68 – Menor potência elétrica em maio de 2018 – 24/05/18 – 3,1 kWh – Fortaleza .	190
Gráfico 69 – Irradiância –24/05/18 – Fortaleza.....	190
Gráfico 70 – Temperatura do módulo FV – 24/05/18 – Fortaleza	190
Gráfico 71 – Média potência elétrica em maio de 2018 – 08/05/18 – 6,6 kWh – Fortaleza..	191
Gráfico 72 – Irradiância –08/05/18 – Fortaleza.....	191
Gráfico 73 - Temperatura dos módulos FV – 08/05/18 – Fortaleza.....	191
Gráfico 74 – Maior potência elétrica em maio de 2018 – 14/05/18 – 8,9 kWh – Fortaleza ..	192
Gráfico 75 – Irradiância – 14/05/18 – Fortaleza.....	192
Gráfico 76 - Temperatura do módulo FV – 14/05/18 – Fortaleza.....	193
Gráfico 77 – Geração de energia elétrica diária – julho 2018 – Maracanaú	194
Gráfico 78 – Menor potência elétrica em julho de 2018 – 10/07/2018 – Maracanaú	194
Gráfico 79 – Irradiância – 10/07/18 – Maracanaú.....	195
Gráfico 80 – Temperatura do módulo FV – 10/07/18 – Maracanaú	195
Gráfico 81 – Média potência elétrica em julho de 2018 – 04/07/2018 – Maracanaú.....	196
Gráfico 82 – Irradiância – 04/07/2018 – Maracanaú.....	196
Gráfico 83 – Temperatura do módulo FV – 04/07/2018 – Maracanaú	196
Gráfico 84 – Maior potência elétrica em julho de 2018 – 20/07/2018 – Maracanaú	197
Gráfico 85 – Irradiância – 20/07/2018 – Maracanaú.....	197
Gráfico 86 – Temperatura dos módulos FV – 20/07/2018 – Maracanaú	198
Gráfico 87 – Geração de energia elétrica diária – fevereiro 2018 - Maracanaú.....	199
Gráfico 88 – Menor potência elétrica em fevereiro de 2018 – 12/02/18 – Maracanaú.....	199
Gráfico 89 – Média potência elétrica em fevereiro de 2018 – 24/02/18 – 5 kWh – Maracanaú	200
Gráfico 90 – Maior potência elétrica em fevereiro de 2018 – 26/02/18 – 7,3 kWh – Maracanaú	200

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eficiência de Conversão de células solares.	26
Tabela 2 – Comparação entre DATS e sistemas de monitoramento IoT a partir da revisão bibliográfica	37
Tabela 3 – Consumo de energia do REMS	44
Tabela 4 – Sensores implementados.....	44
Tabela 5 – Sistema embarcado e sensores implementados nas plantas da rede IoT	60
Tabela 6 – Consumo do ESP 32	84
Tabela 7 – Valores de resistência do PT100 de acordo com temperatura.....	86
Tabela 8 – Lógica de multiplexação dos sensores PT100	90
Tabela 9 – Especificações do piranômetro LP02	92
Tabela 10 – Pinos de conexão dos capacitores do pré-amplificador conectados ao AD.....	94
Tabela 11 – API para leitura e conversão AD.....	97
Tabela 12 – Especificações da tabela de partições	101
Tabela 13 – Exemplo de configuração do SPIFFS.....	102
Tabela 14 – Consumo do ESP 8266	109
Tabela 15 – Especificações do DHT11	110
Tabela 16 – Variáveis monitoradas pelos sistemas de monitoramento: ESP, CLP e inversor PHB	117
Tabela 17 – Resumo de geração do mês de julho de 2018.....	138
Tabela 18 – Resumo de geração do mês de fevereiro de 2018.....	144
Tabela 19 – Resumo de abril e maio de 2018 em Fortaleza e Maracanaú.	145
Tabela 20 – Resumo de junho e julho de 2018 em Fortaleza e Maracanaú.	146
Tabela 21 – Temperatura dos módulos FV – Colônia – setembro e outubro 2017.....	147
Tabela 22 – Temperatura dos módulos FV – Fortaleza x Colônia – nov. 2017 a jan. 2018 ..	148
Tabela 23 – Temperatura dos módulos FV – Fortaleza x Colônia – fevereiro e março 2018	149
Tabela 25 – Temperatura dos módulos FV – Fortaleza x Maracanaú x Colônia – abril 2018	150
Tabela 25 – Temperatura dos módulos FV – Fortaleza x Maracanaú x Colônia – maio 2018	151
Tabela 26 – Temperatura dos módulos FV – Fortaleza x Maracanaú x Colônia – junho 2018	152
Tabela 27 – Temperatura dos módulos FV – Fortaleza x Maracanaú x Colônia – julho 2018	

.....	153
Tabela 28 – Temperatura ambiente, umidade relativa e velocidade do vento – Fortaleza x Maracanaú – maio e julho 2018	154
Tabela 29 – Resposta do AD em bits	172
Tabela 30 – Nove retas de resposta do AD em bits.....	173
Tabela 31 – Resumo de geração do mês de março de 2018	188
Tabela 32 – Resumo de geração do mês de maio de 2018	193

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCES	<i>Analog-digital converter embedded system</i> , Sistema embarcado conversor analógico-digital
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
API	<i>Application Programming Interface</i>
DATS	<i>Data Acquisition and Transmission System</i> , Sistema de Aquisição e Transmissão de Dados
ELS	<i>Embedded Linux System</i> , Sistema Embarcado Linux
ER	Energias Renováveis
ESP IDF	<i>Espressif IoT Development Framework</i>
FC	Fator de capacidade
FF	Fator de forma
FV	Fotovoltaico
GEE	Gases de Efeito Estufa
GPIO	Pino de entrada e saída digital
HTML	<i>Hyper Text Mark-up Language</i>
IoE	<i>Internet of Energy</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LEA	Laboratório de Energias Alternativas
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transfer</i>
NOCT	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i> , Temperatura nominal de operação da célula
NTP	<i>Network Time Protocol</i>
OTA	<i>Over the air</i>
PVT	<i>Photovoltaic-Thermal</i>
REMS	<i>Renewable Energy Monitoring System</i> , Sistema de Monitoramento de Energia Renovável
REN	Resolução Normativa
RPi	Raspberry Pi
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i>
SPIFFS	<i>SPI Flash File System</i>
STA	<i>Station</i> , estação
TD	Taxa de desempenho
TH Köln	<i>Technische Hochschule Köln</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
Y	<i>Yield</i> , produtividade

LISTA DE SÍMBOLOS

V_{oc}	Tensão de circuito aberto
I_{sc}	Corrente de curto circuito
P	Consumo de energia em Wh/day
I_a	Consumo de corrente em modo ativo
V	Tensão do sistema
T_a	Tempo de trabalho em modo ativo
T_i	Tempo de trabalho em modo inativo
V_{out}	Tensão de saída amplificada
V_{IN2}	Entrada de tensão na porta não-inversora
V_{IN1}	Entrada de tensão na porta inversora
Lx	Ganho de amplificação
V_{pos}	Variável de contagem de pontos da onda senoidal do anemômetro
vel	Velocidade do vento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	Aplicações de DATS	29
2.2	Internet das coisas (IoT) e redes de monitoramento	32
3	PRIMEIRA ETAPA: SISTEMA EMBARCADO REMS.....	38
3.1	Desenvolvimento do REMS	39
3.2	Web monitor desenvolvido.....	47
3.3	Resultados da primeira etapa - REMS	53
4	SEGUNDA ETAPA: REDE DE MONITORAMENTO IOT	58
4.1	Plantas FV da rede IoT	60
4.1.1	<i>Planta monitorada em Colônia - Alemanha</i>	60
4.1.2	<i>Planta instalada e monitorada em Fortaleza - CE</i>	66
4.1.3	<i>Planta instalada e monitorada em Maracanaú - CE</i>	72
5	SISTEMAS EMBARCADOS E CIRCUITOS DE CONDICIONAMENTO DO MONITORAMENTO IOT.....	78
5.1	Inversor FV	78
5.2	Sistema embarcado ESP 32.....	81
5.2.1	<i>Condicionamento do sensor de temperatura PT100</i>	86
5.2.2	<i>Condicionamento do piranômetro</i>	91
5.2.3	<i>Conversor analógico-digital do ESP 32</i>	94
5.3	Gravação via OTA (<i>Over the Air updates</i>).....	98
5.4	Armazenamento <i>offline</i> com “ <i>SPIFFS File System</i> ”	101
5.5	Programação implementada no ESP 32	102
5.6	Sistema embarcado ESP 8266.....	108
6	RESULTADOS.....	116
6.1	Comparativo de microgeração elétrica FV – Fortaleza e Maracanaú.....	119
6.1.1	<i>Produtividade de microgeração elétrica FV – Fortaleza e Maracanaú</i>	120
6.1.2	<i>Fator de capacidade de microgeração elétrica FV – Fortaleza e Maracanaú</i>	121
6.1.3	<i>Taxa de desempenho de microgeração elétrica FV – Fortaleza e Maracanaú</i>	122
6.2	Análise dos meses com maior e menor geração de energia elétrica em Fortaleza e Maracanaú.....	125

6.2.1	<i>Maior geração de energia elétrica em Maracanaú: março de 2018</i>	126
6.2.2	<i>Menor geração de energia elétrica em Maracanaú: maio de 2018</i>	129
6.2.3	<i>Maior geração de energia elétrica em Fortaleza: julho de 2018</i>	134
6.2.4	<i>Menor geração de energia elétrica em Fortaleza: fevereiro de 2018</i>	139
6.3	Análise da temperatura dos módulos FV em Fortaleza, Maracanaú e Colônia.	147
7	CONCLUSÃO	158
	TRABALHOS FUTUROS	161
	REFERÊNCIAS	162
	APÊNDICE A - PRODUÇÃO VINCULADA AO PROJETO DE PESQUISA.	168
	APÊNDICE B – DADOS TÉCNICOS DO INVERSOR FV – PHB 1500-NS	169
	APÊNDICE C – LISTA DE PINOS E ESQUEMÁTICO DO ESP 32	170
	APÊNDICE D – CALIBRAÇÃO DO CANAL AD DO ESP 32	172
	APÊNDICE E – UTILIZANDO OTA	174
	APÊNDICE F – PROGRAMANDO ESP 32 COM ECLIPSE E ESP-IDF	181
	APÊNDICE G – PROGRAMAÇÃO DO ANEMÔMETRO	184
	APÊNDICE H – GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM FORTALEZA EM MARÇO DE 2018	185
	APÊNDICE I – GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM FORTALEZA EM MAIO DE 2018	189
	APÊNDICE J – GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM MARACANAÚ EM JULHO DE 2018	194
	APÊNDICE K – MÊS DE MENOR GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM MARACANAÚ: FEVEREIRO 2018	199
	APÊNDICE L – PVT UTILIZANDO CO₂ COMO FLUIDO REFRIGERANTE EM COLÔNIA - ALEMANHA	201