

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

Gustavo dos Santos Barbosa Lima

**Estratégias de Gerenciamento de Energia Elétrica em Casas Inteligentes com
Integração de Recurso Fotovoltaico em Redes Isoladas Microgrid**

Maracanaú, Ceará

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário
Gláucio Barreto de Lima - CRB-3/995

- L732 Lima, Gustavo dos Santos Barbosa.
Estratégias de gerenciamento de energia elétrica em casas inteligentes com integração de recurso fotovoltaico em redes isoladas Microgrid / Gustavo dos Santos Barbosa Lima -- 2018.
146 f.
- Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) -
- Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, *campus* Maracanaú, 2018.
Orientador: Prof. Dr. José Renato de Brito Sousa.
1. ENERGIA ELÉTRICA - EFICIÊNCIA. 2. ENERGIA ELÉTRICA - ECONOMIA. 3. INTERNET DAS COISAS.
I.Título.

333.7932

Gustavo dos Santos Barbosa Lima

Estratégias de Gerenciamento de Energia Elétrica em Casas Inteligentes com Integração
de Recurso Fotovoltaico em Redes Isoladas Microgrid

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em energias renováveis. Área de concentração: Energias Renováveis.

Prof. Dr. José Renato de Brito Sousa

Maracanaú, Ceará

2018

*Este trabalho é dedicado às minhas três tias,
Maria Eliane, Helena Cláudia e Roseane Gomes que sempre
me apoiaram e proporcionaram condições para que este
sonho fosse realizado.*

Agradecimentos

A Deus, pela concretização desta dissertação.

Aos professores André Pimentel, Marcos Dantas, Romeu Monteiro e Antonieta que acreditaram na minha capacidade intelectual para que eu pudesse ingressar com êxito neste mestrado. Todos os esforços gastos durante a minha caminhada serão sempre lembrados com a fiel gratidão de um aluno que reconhece a importância dos que me engrandeceram por meio do conhecimento.

Ao meu grande tio Elinelson Guedes, pelo intenso apoio que me proporcionou, não deixando os meus dias de trabalho serem mergulhados em meio a preocupações do cotidiano.

Ao meu ilustre tio Claudevaldo Guedes, que cuidou das minhas coisas como se fossem para ele.

Ao tio Evaldo Guedes, pela contribuição nos momentos em que precisei, juntamente com os conselhos distribuídos por meio das conversas compartilhadas tomando aquele vinho.

Ao tio Elinaldo Guedes, que de alguma forma contribuiu indiretamente.

Ao meu orientador Prof. José Renato de Brito Sousa, pela paciência e compreensão nos momentos em que eu tive dificuldade para prosseguir até a conclusão desta dissertação.

Ao meu grande avô Geraldo Barbosa Lima, que sempre me proporcionou todo o apoio financeiro, presenteado-me com livros e um pedaço do teto de sua casa para que eu pudesse me acomodar. Portanto, deu-me a oportunidade dos intensos dias de estudos que resultou na realização deste projeto. Em sua casa, nada me faltou. Pois lá, tornei-me um ser humano melhor.

À minha tia Maria, por ser uma tia-mãezona. Meu amor, sempre tão atenciosa e cuidadosa. Não deixou faltar nada para mim, durante esses anos de luta. Fez o possível para me manter confortável. Também, sou grato por sempre contribuir para o enriquecimento do meu conhecimento, durante a minha vida passei por um processo de transformação ideológica e esta tia foi quem mais contribuiu para a minha formação intelectual. Sendo a principal responsável por me ajudar a evoluir o pensamento crítico. Eu te amo minha tia-mãezona. O seu ZÉ está se tornando Mestre.

À minha tia Claudinha. É com muita emoção que escrevo este agradecimento. Fica até difícil conter as lágrimas agora. Meu amor, se os anjos de Deus existirem, eu tenho certeza que você é um deles. Tive o privilégio de estar convivendo bem próximo de você e desejo me tornar um ser humano com o espírito evoluído assim como o seu. Tu és a minha inspiração para que eu continue a acreditar de que por meio do amor, todo o mal se

transforme para o bem. Também, lembro-me que até quando não podias me ajudar financeiramente, você corria atrás e fazia as famosas vaquinhas. Do carrinho de controle remoto que ainda está guardado na minha estante até a preocupação com a minha saúde, o amor e o carinho que sempre me deu são coisas incontestáveis. Portanto, à você minha tia Claudinha, toda a minha gratidão de uma vida inteira, por tudo o que sempre fizeste por mim. Quando alguém me perguntar como venci meus obstáculos, mencionarei o seu nome como a principal responsável por fazer parte das minhas conquistas. Eu te amo, Tia-mãe. Obrigado por existir e conte sempre comigo. O que tens feito por mim é impagável.

À minha tia Rosa. Se não fosse com a ajuda dela nada teria acontecido neste projeto. Ajudou-me a correr atrás, fazendo minha matrícula e durante esses anos me fez muito feliz com todo apoio transmitido. Amo-te, minha amada tia.

Ao meu Pai, Francisco Jorge e sua esposa Luduina, com toda paciência do mundo, receberam-me diversas vezes em sua casa e sempre permaneceram me motivando para que eu continuasse firme nessa jornada.

Aos colegas de Laboratório, Amanda Freitas, Andeferson Mendes, Deusimar Ribeiro, Jônatas Sousa, Rogério Segundo, Navar Medeiros, Igor Sousa, Maurílio de Lima e Victor Teixeira por proporcionarem contribuições relevantes no desenvolvimento deste projeto.

Aos meus primos Raphael Arruda e Márcia Regis, por proporcionarem ao leitor desta dissertação uma escrita suave e uma leitura gostosa.

À minha nega véia, Luzanira Lopes por ter me ajudado financeiramente durante toda a minha trajetória de intenso estudo em Fortaleza.

À maior empreendedora da minha vida, minha mãe, Lucivalda Guedes por ser o meu maior apoio nessa caminhada da vida. Se cheguei até aqui, foi com a força que ela transmitiu nos momentos em que eu queria deixar tudo para trás. A única mulher que enfrenta várias batalhas todos os dias para ver o maior orgulho da vida dela vencer. É com toda a gratidão minha mãe, que nunca deixarei você vivendo dias ruins. Estarei sempre com você evoluindo a sua vida também. Já nos emocionamos várias vezes com conclusões de projetos e ainda pretendo subir mais um degrau. Sei que você já está sonhando com o próximo passo. Eu te amo minha amada mãe.

“Não é o crítico que importa, nem aquele que mostra como o homem forte tropeça, ou onde o realizador das proezas poderia ter feito melhor. Todo o crédito pertence ao homem que está realmente na arena, cujo rosto está sujo de poeira, suor e sangue; que se esforça corajosamente; que fracassa repetidas vezes, porque não há esforço sem obstáculos, mas que realmente se empenha para realizar as tarefas; que sabe o que é ter grande entusiasmo e grande devoção e que exaure suas forças numa causa digna; que no final descobre o triunfo das grandes realizações e, caso venha a fracassar, ao menos fracassa ousando muito, de forma que seu lugar nunca será junto às almas frias e tímidas que não conhecem nem a vitória nem a derrota.”

(Theodore Roosevelt, 1812, em The Man in The Arena)

Resumo

O conceito das Redes Elétricas Inteligentes (REI), do inglês *Smart Grid*, está relacionado à abordagem da rede de energia elétrica dotada de tecnologias digitais, recursos computacionais avançados e de comunicação para o monitoramento e o gerenciamento da eletricidade ao longo da estrutura de transporte e distribuição até os consumidores finais. Com base no conceito das REI o aumento do uso de dispositivos eletrônicos em casas e edifícios tem oferecido benefícios em muitas áreas como: Eficiência Energética, Conforto, Segurança, Cuidados com a Saúde e Recursos de Entretenimento. Este cenário possibilitou um importante crescimento no campo da inteligência ambiental que envolve mudanças significativas na vida cotidiana das pessoas. Esta inteligência ambiental se aplica a um ambiente de computação contínua, utilizando protocolos de comunicação de redes sem fio e Internet das Coisas (IoT). Possui interação com o consumidor por meio da presença humana no ambiente, umidade, temperatura, controle do sistema de iluminação e do Sistema de Aquecimento e Ar Condicionado (HVAC). Além disso, os benefícios do desenvolvimento desse projeto promovem a economia de energia, a eficiência e a melhoria do conforto numa Casa Inteligente (CI). Neste trabalho são apresentadas várias estratégias de gerenciamento de energia definidas por meio do uso de algoritmos. Um sistema de supervisão chamado (Ayla) foi desenvolvido para validação dessas estratégias do Sistema de Gerenciamento de Energia (SGE) de uma CI. Os algoritmos implementados no SGE foram modelados em Redes de Petri, a fim de visualizar os modos de operação com economia de energia, eficiência e conforto doméstico. Dentre os resultados obtidos com essas estratégias adotadas, a economia no consumo de energia atingiu 6 kWh quando comparados ao funcionamento do sistema sem gerenciamento. Os testes realizados neste trabalho foram executados durante os períodos de maior movimento no Laboratório de Processamento de Energia (LPE) usando os mesmos recursos de uma CI.

Palavras-chaves: Casa Inteligente, Conforto, Eficiência Energética, Energias Renováveis, Internet das Coisas, Redes Elétricas Inteligentes, Sistema de Gerenciamento de Energia.

Abstract

The concept of Smart Grid (SG) is related to the approach of the electric power network with digital technologies, advanced computational resources and communication for the monitoring and management of electricity throughout the structure of transport and distribution to the final consumers. Based on the SG concept the increase of the use of electronic devices in homes and buildings has been offering benefits in many areas such as: Energy Efficiency, Comfort, Security, Health Care and Entertainment Features. This scenario has enabled an important growth in the field of environmental intelligence that involves significant changes in people's daily lives. This environmental intelligence is applied in the continuous computing environment, using wireless network protocols and Internet of Things (IoT). It has interaction with the consumer through the human presence in the environment, humidity, temperature, control of the lighting system and the Heating and Air Conditioning System (HVAC). In addition, the benefits of the development of this project promote energy saving, efficiency and the improvement of the customer comfort in Smart Home (SH). In this work is presented several energy management strategies defined through the use of algorithms. A supervisory system called (Ayla) was developed for the tests and validation of the Energy Management System (EMS) of a SH. The implemented algorithms in the EMS were modeled in Petri Nets with the purpose of demonstrate the operation modes with energy saving, efficiency and domestic environment. Among the results obtained with these adopted strategies, the saving in energy consumption reached 6 kWh when compared to the operation of the system unmanaged. The tests in this work were performed during periods of large movement in the Laboratory of Energy Processing (LPE) using the same resources of an SH.

Key-words: Smart Home, Comfort, Energy Efficiency, Renewable Energy, Internet of Things, Smart Grid, Energy Management System.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Modelo de SEP tradicional	24
Figura 2 – Modelo conceitual das REI	25
Figura 3 – Modelo de uma CI	28
Figura 4 – Modelo de uma HAN	30
Figura 5 – Exemplo do Software desenvolvido no LPE do IFCE	32
Figura 6 – Elementos básico da IoT	38
Figura 7 – Exemplo de uma RP	43
Figura 8 – Disparo de uma transição numa RP.	44
Figura 9 – Sistema FV Conectado a Rede	47
Figura 10 – Sistema FV Isolado	47
Figura 11 – Sistema de gerenciamento de energia	51
Figura 12 – Plataformas lógicas do sistema supervisorio (<i>Software</i>)	59
Figura 13 – Plataformas físicas do SGE (<i>Hardware</i>)	60
Figura 14 – Estrutura do SGE proposto	61
Figura 15 – Diagrama do processo de interação entre as plataformas do SGE	62
Figura 16 – Ambiente da aplicação do projeto	64
Figura 17 – Esquema elétrico dos sensores e atuadores no LPE	65
Figura 18 – Calibração do sensor de tensão CA	66
Figura 19 – Ajustes de regressão aplicados aos sensores de tensão CA	67
Figura 20 – Calibração dos sensores de corrente CA	67
Figura 21 – Gráfico de leitura das correntes	68
Figura 22 – Diagrama de blocos do subsistema de Iluminação	69
Figura 23 – Iluminância durante um dia no LPE	70
Figura 24 – Subsistema de atuação em cargas	71
Figura 25 – Subsistema de controle de AC	72
Figura 26 – Subsistema de monitoramento do ambiente	73
Figura 27 – Localização dos sensores e atuadores no LPE	74
Figura 28 – Programa desenvolvido para o termômetro NTC no LabVIEW	75
Figura 29 – Exemplo de gráfico de temperatura do sistema supervisorio	75
Figura 30 – Valores de temperatura medidos pelos sensores NTC e DHT11 para um AC ligado	76
Figura 31 – Valores de temperatura medidos pelos sensores NTC e DHT11 para dois AC ligados	76
Figura 32 – Subsistema de monitoramento da rede elétrica	77
Figura 33 – Monitoramento da rede elétrica - Tensão (V)	77
Figura 34 – Monitoramento da rede elétrica - Corrente (A)	77

Figura 35 – Monitoramento da rede elétrica - Potência aparente (VA)	78
Figura 36 – Esquema de ligação do medidor de qualidade de energia	78
Figura 37 – Medição de potência aparente	79
Figura 38 – Subsistema de monitoramento da energia solar FV	79
Figura 39 – Principais componentes do sistema FV	80
Figura 40 – Interface gráfica do sistema supervisor Ayla	84
Figura 41 – Diagrama de Componentes do SGE	87
Figura 42 – Diagrama de Casos de Uso do Sistema Ayla	88
Figura 43 – Exemplos de modelagem em RP utilizando construtores primitivos	89
Figura 44 – Algoritmo de Operação I - Condições Ambientais	90
Figura 45 – Modelo RP do Algoritmo I	91
Figura 46 – Algoritmo II - Modo de operação 1	92
Figura 47 – Algoritmo II - Modo de operação 2	93
Figura 48 – Algoritmo II - Modo de operação 3	94
Figura 49 – Modelo RP do Algoritmo II	94
Figura 50 – Algoritmo III - Condições do Ambiente + Energias Renováveis	96
Figura 51 – Modelo RP do Algoritmo III	97
Figura 52 – Mapa da Rede IoT	97
Figura 53 – Tempo de envio de Pacotes ICMP - Monitoramento da Rede Elétrica	98
Figura 54 – Tempo de envio de Pacotes ICMP - Monitoramento do Ambiente	99
Figura 55 – Perdas de Pacotes ICMP - Monitoramento do Ambiente	99
Figura 56 – Perdas de Pacotes ICMP - Monitoramento da Rede Elétrica	99
Figura 57 – Computador para armazenamento e análise dos dados coletados pelo Ayla	100
Figura 58 – Laboratório de Processamento de Energia - LPE	103
Figura 59 – Potência ativa por fase - Sem gerenciamento	103
Figura 60 – Potência ativa trifásica - Sem gerenciamento	104
Figura 61 – P. Ativa - Gerenciamento usando condições do ambiente	104
Figura 62 – Condições de Temperatura	105
Figura 63 – P. Total - Gerenciamento usando condições do ambiente	105
Figura 64 – Gerenciamento com energia renovável	106
Figura 65 – Potência Total - Gerenciamento com energia renovável	107
Figura 66 – Corrente fornecida pelo BB - Teste III	108
Figura 67 – SoC - Teste III	108
Figura 68 – Potência Ativa Nível 2	109
Figura 69 – Potência Total - Nível 2	110
Figura 70 – Potência Ativa - Nível 3	111
Figura 71 – Potência Total - Nível 3	111
Figura 72 – Potência Ativa	113
Figura 73 – Potência Total	113

Figura 74 – Corrente FV	114
Figura 75 – Irradiância	114
Figura 76 – SoC	114
Figura 77 – Classificação de Desempenho de Eficiência	115
Figura 78 – Calibração do sensor de tensão	129
Figura 79 – Conjunto de cargas (lâmpadas)	129
Figura 80 – Subsistema de iluminação	130
Figura 81 – Conexão dos componentes - Iluminação	131
Figura 82 – Conexão dos componentes - <i>Smart Plug</i>	132
Figura 83 – <i>Smart Plug</i>	132
Figura 84 – Conexão dos componentes - Controle do AC	133
Figura 85 – AC I	133
Figura 86 – AC II	133
Figura 87 – Microcontrolador e dispositivos de atuação IR	134
Figura 88 – Conexão dos componentes - Monitoramento do ambiente	135
Figura 89 – Módulo de aquisição de dados NI 6009	135
Figura 90 – Tela do termômetro NTC no LabVIEW	136
Figura 91 – Arduino com sensor DHT11	136
Figura 92 – Conexão dos componentes - Monitoramento da rede elétrica	137
Figura 93 – Módulo de monitoramento da rede elétrica	137
Figura 94 – Versão final do módulo de monitoramento da rede elétrica	138
Figura 95 – Medidor de qualidade de energia	138
Figura 96 – Conexão dos componentes - Monitoramento da energia solar FV	139
Figura 97 – Módulo de monitoramento do subsistema FV1	139
Figura 98 – Painel elétrico do controlador de carga do subsistema FV1	140
Figura 99 – Módulo de monitoramento do subsistema FV2	140
Figura 100 – Matriz de painéis do subsistema FV2	140
Figura 101 – Painel elétrico do subsistema FV2	141
Figura 102 – Banco de baterias do subsistema FV2	141
Figura 103 – Circuito do Piranômetro	141
Figura 104 – Informação de previsão do tempo	142
Figura 105 – Configuração do sistema	142
Figura 106 – Controle dos AC	142
Figura 107 – Testes de comunicação	143
Figura 108 – Esquema elétrico de comutação	145

Lista de tabelas

Tabela 1 – Domínio e atores do modelo conceitual das REI	25
Tabela 2 – Comparação da rede elétrica tradicional x REI	27
Tabela 3 – Classificação do nível de eficiência da Turquia	33
Tabela 4 – Calibração dos sensores de tensão CA	66
Tabela 5 – Calibração do sensor de corrente CA	68
Tabela 6 – Características Técnicas dos AC I e II	72
Tabela 7 – Características elétricas e construtivas da bateria Moura 12MF150 . . .	81
Tabela 8 – Marcações e grafo de alcançabilidade da RP do Algoritmo I	91
Tabela 9 – Marcações e grafo de alcançabilidade da RP do Algoritmo II	95
Tabela 10 – Marcações e grafo de alcançabilidade da RP do Algoritmo III	98
Tabela 11 – Equipamentos do LPE	101
Tabela 12 – Casos do Algoritmo III	112
Tabela 13 – Classificação dos resultados dos algoritmos testados	116

Lista de abreviaturas e siglas

AC	Ar Condicionado
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
API	<i>Application Programming Interface</i>
BB	Banco de Baterias
B	<i>Byte</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CI	Casa Inteligente
CPU	Unidade de processamento Central
eMMC	<i>MultiMedia Card</i>
DR	Resposta em Demanda
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
ETE	Ponto-a-Ponto
EXI	<i>Efficient XML Interchange</i>
FV	Fotovoltaico
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
HAN	<i>Home Area Network</i>
HDMI	<i>High-Definition Multimedia Interface</i>
HVAC	<i>Heating and Air Conditioning System</i>
I2C	<i>Inter-integrated Circuit</i>
ICMP	<i>Internet Control Message Protocol</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>

IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IHD	<i>In-Home-Display</i>
IR	Infravermelho
IP	Protocolo de Internet
KNX	Konnex
LPE	Laboratório de Processamento de Energia
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>
NBR	Norma Brasileira
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
OWL	<i>Web Ontology Language</i>
PC	Computador Pessoal
PLC	Controlador Lógico Programável
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RDF	<i>Resource Description Framework</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
REI	Redes Elétricas Inteligentes
RFID	<i>Radio-Frequency IDentification</i>
RP	Redes de Petri
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
SD	<i>Secure Digital</i>
SED	Sistema a Eventos Discretos
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SGE	Sistema de Gerenciamento de Energia
SoC	<i>State of Charge</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>

SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
TI	Tecnologia da Informação
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
UPnP	<i>Universal Plug-and-Play</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
Wp	<i>Watt-pico</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	JUSTIFICATIVA	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo Geral	21
1.2.2	Objetivos específicos	21
1.3	Publicações produzidas	22
1.4	Estrutura do documento	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES NO BRASIL	23
2.1.1	Modelo Conceitual de Redes Elétricas Inteligentes	24
2.1.2	Perspectivas das REI	25
2.1.3	Comparação entre os modelos de Rede Elétrica	26
2.2	APLICAÇÃO DAS REI EM CASAS INTELIGENTES	26
2.2.1	Medição Eletrônica	29
2.2.2	Comunicação	29
2.2.3	Sensoriamento	30
2.2.4	Computação	31
2.2.5	Eficiência Energética	31
2.2.6	Conforto do Ambiente	33
2.2.7	Viabilidade de Uso	34
2.3	ARQUITETURAS DE COMUNICAÇÃO	35
2.3.1	Protocolos de Comunicação	35
2.4	INTERNET DAS COISAS - IoT	37
2.4.1	Elementos Básicos	37
2.4.2	Plataformas para IoT	38
2.4.3	Visão geral da aplicação da tecnologia IoT	39
2.5	REDES DE PETRI	40
2.5.1	Fundamentos	40
2.5.2	Características	42
2.5.3	Elementos de uma RP	42
2.5.4	Definição	42
2.5.5	Dinâmica de uma RP	43
2.5.6	Análise da RP	44
2.6	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	46

2.6.1	Sistemas FV	46
2.6.2	Monitoramento de Sistemas FV	49
2.7	SISTEMAS SUPERVISÓRIOS	49
2.7.1	Características do Sistema	49
2.8	MODELAGEM UML	51
2.9	Comentários finais	52
3	REVISÃO DA LITERATURA	53
3.1	Comentários finais	58
4	MATERIAIS E MÉTODOS	59
4.1	O SGE Proposto	59
4.2	Sensores e Atuadores	61
4.3	Proposta de Ambiente (CI)	64
4.4	Calibração dos Sensores de Tensão e Corrente CA	65
4.5	<i>Hardware</i> do Sistema	69
4.5.1	Subsistema I - Iluminação	69
4.5.2	Subsistema II - <i>Smart Plugs</i>	71
4.5.3	Subsistema III - Ar Condicionado	72
4.5.4	Subsistema IV - Monitoramento do Ambiente	73
4.5.5	Subsistema V - Monitoramento da Rede Elétrica	76
4.5.6	Subsistema VI - Monitoramento da Energia Solar FV	78
4.5.7	Subsistema VII - Piranômetro	82
4.6	<i>Software</i> do Sistema	83
4.6.1	Sistema Supervisório (Ayla)	83
4.7	Análise dos Requisitos	85
4.7.1	Modelagem UML do Sistema Supervisório Ayla	87
4.8	Algoritmos de Operação - Modelagem em RP	88
4.8.1	Algoritmo I - Condições do Ambiente	90
4.8.2	Algoritmo II - Integração de Energias Renováveis	91
4.8.3	Algoritmo III - Condições do Ambiente + Energias Renováveis	93
4.9	Análise da Rede de Comunicação	95
4.9.1	Monitoramento com <i>Zabbix</i>	95
4.9.2	Análise de pacotes de dados e tempo de resposta	96
4.10	Comentários finais	99
5	RESULTADOS	100
5.1	Descrição inicial	100
5.2	Componentes de Testes	101
5.3	Cenário de Testes	102

5.4	Testes dos Algoritmos do SGE	102
5.4.1	Teste 1 - Sem gerenciamento	102
5.4.2	Teste 2 - Algoritmo I - Gerenciamento usando as condições do ambiente	104
5.4.3	Teste 3 - Algoritmo II - Nível 1 - Gerenciamento integrado com energia renovável	106
5.4.4	Teste 4 - Algoritmo II - Nível 2 - Gerenciamento integrado com energia renovável	109
5.4.5	Teste 5 - Algoritmo II - Nível 3 - Gerenciamento integrado com energia renovável	110
5.4.6	Teste 6 - Algoritmo III - Condições do ambiente + energia renovável . .	112
5.5	Discussões dos resultados obtidos	116
5.6	Comentários finais	117
6	CONCLUSÕES	118
6.1	Sugestões de Trabalhos Futuros	119
	REFERÊNCIAS	121
	APÊNDICES	128
	APÊNDICE A – MONTAGEM DOS EQUIPAMENTOS DE CALIBRAÇÃO	129
	APÊNDICE B – SUBSISTEMA DE ILUMINAÇÃO	130
	APÊNDICE C – SUBSISTEMA <i>SMART PLUG</i>	132
	APÊNDICE D – SUBSISTEMA DE AC	133
	APÊNDICE E – SUBSISTEMA DE MONITORAMENTO DO AMBIENTE	135
	APÊNDICE F – SUBSISTEMA DE MONITORAMENTO DA REDE ELÉTRICA	137
	APÊNDICE G – SUBSISTEMAS DE MONITORAMENTO DA ENERGIA SOLAR FV	139
	APÊNDICE H – <i>INTERFACES</i> GRÁFICAS DO SISTEMA SUPERVISÓRIO AYLÁ	142

ANEXOS	144
ANEXO A – SUBSISTEMA DE ILUMINAÇÃO	145

1 INTRODUÇÃO

Muitos países estão se dedicando ativamente no desenvolvimento e implantação de Redes Elétricas Inteligentes (REI), do inglês *Smart Grid*, com volumosos investimentos em pesquisa e recursos tecnológicos (GABBAR, 2017).

No Brasil, a concepção desta tecnologia vem se disseminando cada vez mais e já se observa em algumas empresas e órgãos governamentais atividades relacionadas ao desenvolvimento e implantação das REI. No entanto, essa inovação, apesar de apresentar inúmeros benefícios, ainda deve vencer vários desafios para sua larga inserção no mercado brasileiro, como mostrou o Projeto de P&D Estratégico da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 11/2010 “Programa Brasileiro de Redes Elétricas Inteligentes” (PEREIRA; WEISS, 2017).

A adesão às REI caminha em passos lentos no país, porém a automação das subestações já é uma realidade vigente. Existem diversos projetos piloto no Brasil com instalações de medidores inteligentes nas residências. Dentre os projetos podem ser citados: Cidades do Futuro (Cemig), Cidade Inteligente Búzios (Ampla/Endesa Brasil), *Smart Grid Light* (Light/RJ), Parintins (Eletrobras Amazonas energia), *Smart Grid* (AES Eletropaulo), *InovCity* (Empresa Brandeirante de Energia), Cidade Inteligente Aquiraz (Coelce/Endesa), Paraná *Smart Grid* (COPEL) e Arquipélago de Fernando de Noronha (CELPE) (CRUZ, 2018). Além disso, a aplicação das REI tem incentivado a microgeração distribuída conectada à rede elétrica a partir de fontes renováveis de energia, acarretando em modificações na estrutura tarifária dos consumidores residenciais.

Segundo Bandeira (2012), estas redes são caracterizadas pelo uso de tecnologias de telecomunicação, de sensoriamento, de operações remotas de instalações e de Tecnologia da Informação (TI), adicionadas às instalações físicas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica existentes. A utilização destes recursos tecnológicos possibilita às centrais fornecedoras uma melhoria no gerenciamento e controle da distribuição de energia e aos consumidores a oportunidade de gerenciar melhor o seu consumo (BALAKRISHNAN, 2011).

Dessa forma, para tornar esse conceito efetivo, o consumidor deve participar ativamente nas decisões sobre o seu consumo e possível geração de energia. No entanto, esta nova abordagem do setor elétrico possui vários requisitos em relação aos componentes necessários para sua realização. Esses requisitos são formados pelo *hardware* a ser utilizado no nível dos consumidores e do sistema de distribuição da concessionária, pelos protocolos de comunicação que permitem a interação entre todos os elementos do processo e pelo *software* para execução das estratégias de gerenciamento.

A Casa Inteligente (CI), do inglês *Smart Home*, está se tornando uma realidade no mundo desenvolvido. O seu Sistema de Gerenciamento de Energia (SGE) se integra com microcontroladores, sensores, atuadores e interfaces de comunicação, compondo um conjunto de dispositivos de uma infraestrutura de objetos físicos baseados em *Internet das Coisas* (IoT).

Desse modo, nessas CI os dispositivos eletrônicos nas redes locais de comunicação oferecem benefícios em diversas áreas, como segurança, economia no consumo de energia, eficiência energética, conforto ambiental, cuidados com a saúde e recursos de entretenimento. Estas redes locais de comunicação podem ser configuradas por meio de soluções com fio e sem fio, utilizando diferentes padrões de comunicação. Uma CI também pode ser monitorada e controlada remotamente por meio de uma *Wide Area Network* (WAN) ou pela própria concessionária da rede elétrica (BALAKRISHNAN, 2011).

Portanto, para o funcionamento coordenado desses recursos presentes na infraestrutura de uma CI, neste trabalho é desenvolvido e implementado um sistema de supervisão para realizar o gerenciamento do consumo de energia, da eficiência energética e do conforto visual e térmico. No desenvolvimento desse sistema de supervisão são implementados algoritmos para as operações de gerenciamento. Além disso, pretende-se utilizar a modelagem em Redes de Petri (RP) para verificar os diferentes modos de operação (estados) desses algoritmos. O *hardware* do SGE proposto é composto por sensores e atuadores baseados em IoT que se comunicam por meio de uma rede sem fio.

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Processamento de Energia (LPE) no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza.

1.1 JUSTIFICATIVA

O crescente uso de dispositivos eletroeletrônicos nas residências em geral, tem tornado o consumo de energia elétrica cada vez mais expressivo. Além disso, o sistema de geração pode ser afetado pela escassez de recursos naturais, como a falta de chuvas, sendo necessário o uso de outras fontes de energia. Um exemplo é o uso das usinas termoelétricas, fato que provoca a elevação do preço da energia para o consumidor final.

No contexto das redes elétricas tradicionais o consumidor não dispõe de um sistema capaz de executar, em tempo real, o gerenciamento da energia, informar o seu consumo e quais eletrodomésticos estão ou devem estar em operação. Desse modo, a utilização das REI possibilita o gerenciamento da rede elétrica, e, por conseguinte, os desvios indevidos de energia e as fraudes no sistema de medição podem ser detectados. Comparado ao medidor eletromecânico, o uso do medidor eletrônico possibilita a detecção de fraudes, seja por meio de alarmes e/ou indicadores (BANDEIRA, 2012).

Existe também uma crescente preocupação com o consumo de energia devido o aumento dos requisitos de conforto no mercado. Um aspecto conflitante no interior das residências pode ser caracterizado como uma relação entre a economia de energia e, simultaneamente, o manutenção do conforto térmico por meio do ajuste do nível de temperatura e o conforto visual estabelecido pelo nível de iluminância no ambiente. O gerenciamento de energia em CI é necessário, uma vez que contribui para a redução do consumo de energia ao mesmo tempo que busca atender os requisitos de conforto e controle (SHAIKH et al., 2013).

Neste trabalho, a noção de eficiência energética é importante não só porque favorece a economia do consumo da energia elétrica, mas também porque proporciona, por meio da implementação de algoritmos, o uso adequado do recurso solar fotovoltaico e do banco de baterias integrados ao sistema de gerenciamento de energia de uma CI.

Com isso, em diversas instalações residenciais espalhadas pelo mundo, vários sistemas de gerenciamento de energia têm sido desenvolvidos como resultado de um elevado número de pesquisas. Geralmente, os sistemas a serem controlados numa CI são: iluminação, refrigeração, ventilação e aquecimento, sendo representados para o consumidor por meio de um *In Home Display* (IHD), o qual possui *software* específico e uma interface gráfica (SHAIKH et al., 2013).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento e implementação de um Sistema de Gerenciamento de Energia para uma Casa Inteligente com ênfase no consumo de energia, na eficiência energética e no conforto visual e térmico dos seus ocupantes.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo principal, os seguintes objetivos específicos são realizados:

- Desenvolver o sistema supervisor para o Sistema de Gerenciamento de Energia, visando o consumo de energia, a eficiência energética e o conforto visual e térmico de uma Casa Inteligente.
- Montar e testar o *hardware* para a validação experimental do Sistema de Gerenciamento de Energia proposto.
- Modelar com Redes de Petri os algoritmos utilizados no sistema de supervisão proposto.

- Implementar os algoritmos utilizados no sistema de supervisão.
- Realizar simulações de vários cenários de operação da Casa Inteligente para obter os resultados de desempenho do Sistema de Gerenciamento de Energia proposto.

1.3 Publicações produzidas

Os estudos realizados para concepção desse trabalho também deram origem aos seguintes artigos:

- Redes Elétricas Inteligentes: Um Conceito Residencial. Submetido à revista Holo. Situação atual: Submetido. Autores: G. S. B. Lima e J. R. B. Sousa.
- Strategy for Energy Management System in Smart Homes with Renewable Energy. Submetido à revista Latin America IEEE. Situação atual: Submetido. Autores: G. S. B. Lima e J. R. B. Sousa.

1.4 Estrutura do documento

No Capítulo 2 é apresentada a teoria multidisciplinar fundamental, inicialmente com os modelos conceituais do gerenciamento de redes elétricas inteligentes no Brasil, as perspectivas e comparação para o uso deste sistema, as possíveis arquiteturas de comunicação, a internet das coisas, as Redes de Petri e a energia solar fotovoltaica.

No Capítulo 3 é apresentada uma revisão da literatura que fornece embasamento para este trabalho. São demonstrados os assuntos a respeito do gerenciamento de energia, algoritmos de gerenciamento de energia, conforto do ambiente, redes microgrids, modelagens com Redes de Petri e redes de comunicação.

No Capítulo 4 são apresentados os dispositivos utilizados, os métodos para a realização da proposta do trabalho, os modos de operação deste sistema (estados) em Redes de Petri, incluindo os circuitos eletrônicos, o software desenvolvido e as análises dos resultados preliminares.

No Capítulo 5 são apresentadas as plataformas físicas montadas para os testes de gerenciamento de energia, incluindo a descrição do cenário proposto. Os testes foram divididos de acordo com o uso de cada algoritmo implementado no sistema supervisórios. No total são quatro testes com diferentes tipos de algoritmos.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados conceitos básicos com o intuito de preparar o leitor para compreender o desenvolvimento deste trabalho. Nas seções seguintes é apresentada a fundamentação teórica sobre as redes elétricas inteligentes e sua aplicação nas casas inteligentes, arquiteturas de comunicação, *Internet* das coisas, redes de Petri, energia solar fotovoltaica, sistemas supervisórios e modelagem UML.

2.1 REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES NO BRASIL

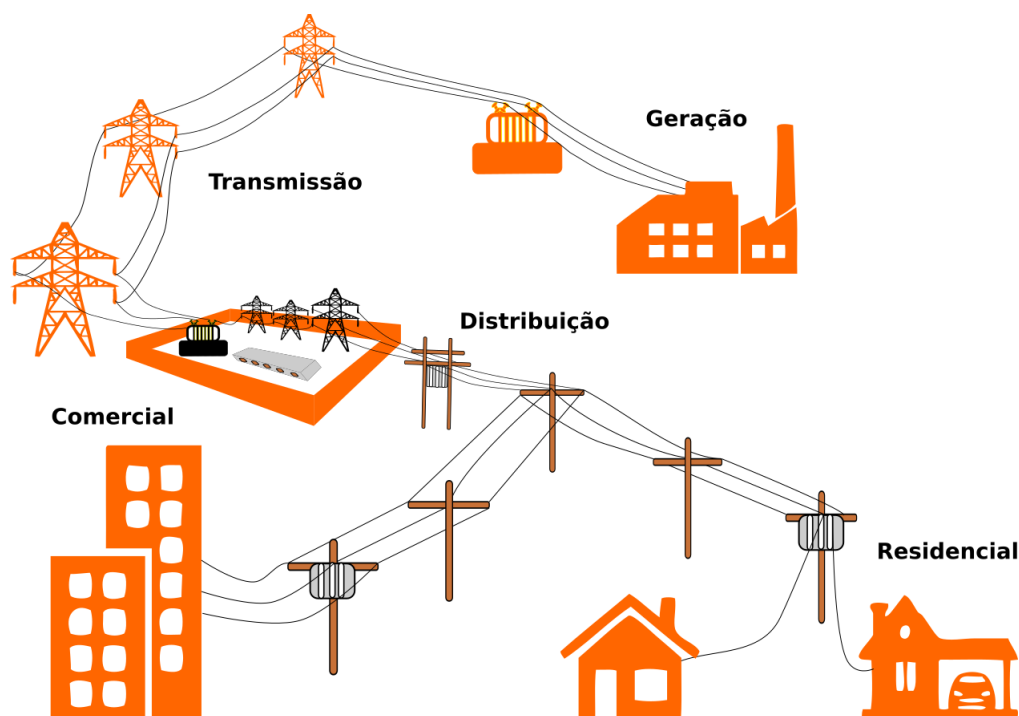
O Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem por função fornecer a energia elétrica solicitada pelos consumidores e com a qualidade adequada. Atualmente, no Brasil, o SEP é formado por centrais elétricas, subestações elevadoras e abaixadoras, linhas de transmissão, linhas de distribuição e consumidores elétricos. Dentre as centrais elétricas, encontram-se as usinas termoeletricas, os parques eólicos, centrais nucleares e as grandes usinas de geração que transformam energia, predominantemente hidráulica, em energia elétrica. Numa definição mais abrangente o SEP é constituído por grandes sistemas de energia que integram geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (PELEGRINI; VALE, 2014).

Desse modo, o SEP possui geração de energia elétrica distante dos grandes centros de consumo, por isso, é imprescindível a existência de um elemento de interligação que permita a transmissão de energia por longas distâncias, o que é feito por meio de sistemas de transmissão de alta tensão (PELEGRINI; VALE, 2014). Na Figura 1 é mostrado o modelo de SEP tradicional.

Como consequência desse processo, a energia elétrica produzida no SEP é distribuída pelas subestações locais para os consumidores (industriais, comerciais e residenciais) seguindo um fluxo de energia unidirecional. Os consumidores são meros agentes passivos na cadeia produtiva da energia elétrica. Por razões tecnológicas, em alguns casos, e razões econômicas, em muitos outros, o mercado de energia elétrica possui algumas limitações na entrega, em tempo real, de informação do preço das tarifas ao consumidor (CGEE, 2012).

No entanto, o uso do gerenciamento de energia desde a concessionária até o consumidor é característica das Redes Elétricas Inteligentes (REI), possibilitando a participação ativa do consumidor no mercado de energia. Atualmente, algumas mudanças tecnológicas, financeiras e sociais são necessárias para implantar um novo conceito na transformação da rede elétrica tradicional em uma rede inteligente (VEGA; SANTAMARIA; RIVAS, 2015). Para isso, a integração de equipamentos de monitoramento, o uso de protocolos

Figura 1 – Modelo de SEP tradicional



Fonte: Adaptado de Yu et al. (2011)

de comunicação em toda a cadeia de produção de energia do SEP e os equipamentos de medição e controle são requisitos para o funcionamento de uma REI.

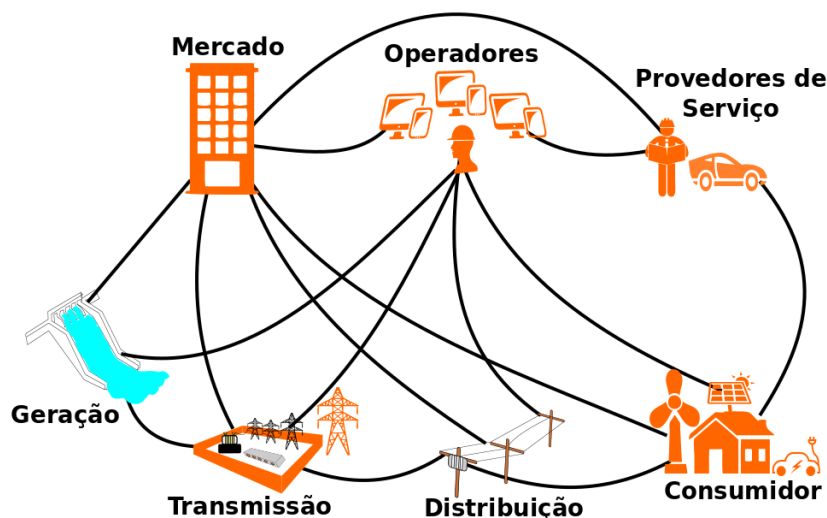
Com a expansão das REI no país, o consumidor poderá produzir a própria energia e utilizar sistemas de gerenciamento de energia visando a eficiência energética e o consumo, já que no setor residencial o consumo vem crescendo no caminho contrário aos outros setores. No ano de 2017, houve um crescimento no consumo de energia elétrica das residências de aproximadamente 1,4 % (EPE, 2017). Atualmente, existem nove projetos pilotos das REI em vigência no Brasil. Portanto, já é uma realidade sendo implementada para tornar o sistema elétrico acessível, moderno e confiável (CRUZ, 2018).

2.1.1 Modelo Conceitual de Redes Elétricas Inteligentes

O modelo conceitual é uma ferramenta útil para os reguladores federais, estaduais e locais avaliarem a melhor forma de alcançar os objetivos de políticas públicas. Juntamente com os objetivos de negócios que motivam investimentos em modernização da infraestrutura de energia elétrica do país e auxiliam a construção de uma economia baseada em energia limpa (NIST, 2010). Na Figura 2 é mostrado o modelo conceitual das REI, sendo exemplificado a interação da comunicação entre os atores da REI.

Este modelo conceitual foi proposto pelo Instituto Nacional de Padrões de Tecnologia dos Estados Unidos (NIST). Uma REI compreende sete principais domínios interligados entre si: geração, transmissão, distribuição, consumidor, mercados, operadores de rede e

Figura 2 – Modelo conceitual das REI



Fonte: Adaptado de [NIST \(2010\)](#)

provedores de serviço ([NIST, 2010](#)). Na Tabela 1, adaptada de [NIST \(2010\)](#), são listados os referidos domínios com as respectivas descrições.

Tabela 1 – Domínio e atores do modelo conceitual das REI

Domínios	Atores do Domínio
Geração	Relacionado às unidades geradoras de grandes parcelas de eletricidade
Transmissão	Relacionado aos recursos de transporte de eletricidade a longas distâncias
Distribuição	Relacionado aos distribuidores de eletricidade aos consumidores
Cliente	Relacionado aos usuários finais da eletricidade que assumem papel de produtor e consumidor – prosumer.
Mercados	Relacionado aos operadores e participantes do mercado de energia
Operadores de Rede	Relacionado aos gerenciamentos do fluxo de eletricidade
Provedores de Serviço	Relacionado aos fornecedores de utilidade e serviços aos consumidores

Fonte: Adaptado de [NIST \(2010\)](#)

2.1.2 Perspectivas das REI

O panorama dos principais fatores motivadores das empresas distribuidoras de energia para a implantação das REI incluem a eficiência comercial e energética, a segurança operacional e sistêmica, o aumento da confiabilidade do sistema elétrico e a sustentabilidade econômica e ambiental ([RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013](#)).

Dentre as perspectivas para a implantação/expansão das REI destacam-se (PELEGRINI; VALE, 2014):

- O crescimento do uso de carros com tração elétrica que podem aumentar o consumo da energia elétrica devido a demanda associada à recarga das baterias desses veículos;
- A redução de custos da operação do sistema a partir de uma maior eficiência operacional, automação de processos, evolução da gerência, maior monitoramento e controle de todos os agentes envolvidos na operação;
- A expectativa de uma melhor gestão dos ativos da empresa, proveniente da definição de melhores políticas de manutenção e substituição desses ativos;
- Proteção à receita e combate às perdas comerciais ou não técnicas; e
- Maior qualidade do fornecimento de energia, sendo esse um dos aspectos mais importantes do segmento, já que as interrupções no fornecimento de energia geram grandes impactos na sociedade.

2.1.3 Comparação entre os modelos de Rede Elétrica

Com a utilização da rede elétrica tradicional, muitos fatores como ineficiência para suprir a demanda de energia, perdas e falta de comunicação contribuem para uma rede de suprimento não confiável. Na Tabela 2 é apresentada uma comparação entre as características das redes elétricas tradicionais e das REI.

2.2 APLICAÇÃO DAS REI EM CASAS INTELIGENTES

O que caracteriza uma rede elétrica como “inteligente” é a capacidade de integrar as ações de todos os agentes a ela conectados, sejam geradores de energia, consumidores ou os chamados “*prosumers*” (do inglês “*producer* e *consumer*”), ou seja, agentes que ora se comportam como geradores de energia, ora como consumidores (VIJAYAPRIYA; KOTHARI, 2011). Dentre os objetivos das REI, busca-se a produção, o transporte, a distribuição e o uso final da energia elétrica de modo eficiente, ambientalmente sustentável, viável economicamente e de forma confiável e segura (POMILIO, 2012).

A Casa Inteligente (CI) é uma área emergente que utiliza um conjunto diversificado de funcionalidades como o uso de preços dinâmicos de energia elétrica e programas de resposta em demanda. Dessa maneira, pretende-se por meio de um sistema de gerenciamento de energia reduzir o consumo de energia, além de proporcionar conforto ambiental. Estas CI estão sendo amplamente estudadas, proporcionando um cenário benéfico na vida das pessoas. Durante a última década, dispositivos inteligentes se tornaram populares e prontamente disponíveis para a maioria das pessoas (CHEN et al., 2017).

Tabela 2 – Comparação da rede elétrica tradicional x REI

Características	Rede Elétrica Tradicional	REI
Participação dos consumidores	Consumidores são desinformados do que está acontecendo na rede elétrica. Não participam como microgeradores.	Consumidores informados, envolvidos. Resposta em demanda e opção para microgeração e distribuição de energia
Acomodação de toda a geração e opções de armazenamento	Comandado pela central de geração – muitos obstáculos existentes para a interconexão da distribuição de energia	Muitos meios de distribuição de energia com conveniência <i>plug-and-play</i> voltados para geração renovável.
Novos produtos, serviços e mercados	Limitada, deficientemente integrada no mercado; insuficiente para as oportunidades ofertadas ao consumidor	Aperfeiçoada, bem integrada na venda de energia por atacado no mercado; novas oportunidades de mercado de eletricidade para os consumidores.
Suprimento de eletricidade com qualidade para a economia digital	Comumente focada nas interrupções elétricas – resposta lenta nos problemas de qualidade	Prioridade na qualidade da eletricidade com uma variedade de opções de tarifas - rápida resolução de problemas
Otimização de ativos e operação eficiente	Pouca integração de gerenciamento e operacionalidade de dados	Excelente operacionalidade na aquisição de parâmetros na rede; focado em prevenção, minimizando o impacto no consumidor
Antecipação de respostas aos distúrbios do sistema (Autorrecuperação)	Responde a evitar grandes danos; foco na proteção de equipamentos na sequência de um seguimento na rede. Consumidor precisa comunicar a fornecedora que está sem energia	Automaticamente detecta e toma decisões sobre o problema; foco na prevenção e minimização do impacto sobre o consumidor
Resiliência contra ataques cibernéticos e desastres naturais	Vulnerável a ações maliciosas como desvios de energia e desastres naturais; resposta demorada	Resiliente a ataques cibernéticos e desastres naturais; rápida restauração de sua capacidade elétrica

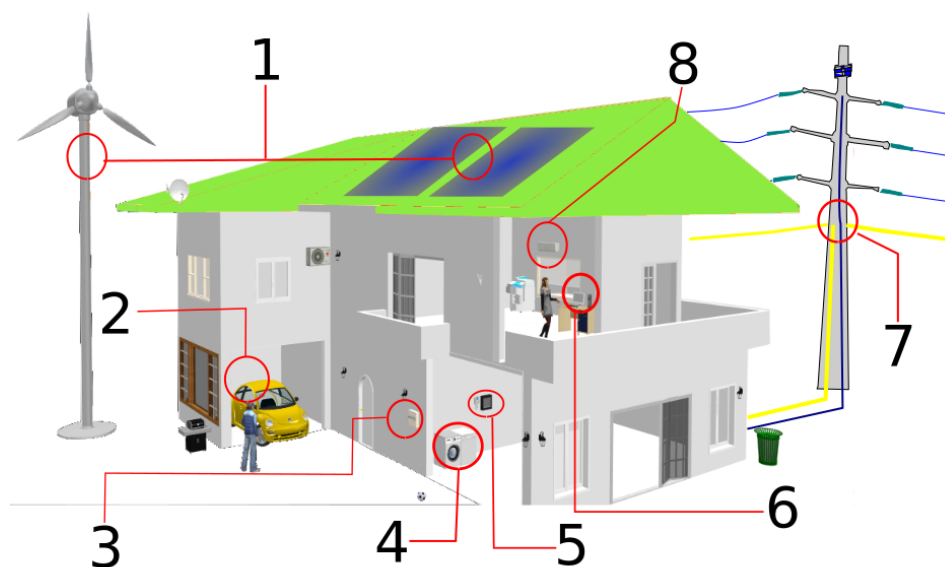
Fonte: Adaptado de Momoh (2012)

Na década de 80, o conceito de CI ou do inglês *Smart Home* foi proposto pela *National Association of Home Builders* (NAHB) nos Estados Unidos. Desde então, o conceito de CI rapidamente se espalhou por todo o mundo. Uma CI é definida como um sistema que possui eficiência no uso das instalações residenciais, gerenciamento de energia e transformação de equipamentos estáticos em equipamentos de rede controláveis, proporcionando aos usuários informações abrangentes em tempo real (XU et al., 2016).

Com as capacidades de comunicação interativa e controle remoto, aparelhos inteligentes, como máquinas de lavar inteligentes, aquecedores inteligentes, executam inteligentemente suas funções e tarefas específicas para os ocupantes, assim como os funcionários domésticos que realizam suas próprias tarefas predefinidas. Na Figura 3 é apresentado um modelo de CI.

1. **Energia Alternativa:** É aquela que pode ser obtida a partir de várias fontes de energia. Estas fontes incluem, entre outras, as energias renováveis como por exemplo, a energia solar fotovoltaica e a eólica.
2. **Veículo de baixa emissão de carbono:** Carros híbridos e elétricos podem armazenar sua energia durante períodos em que a energia renovável excede a demanda.

Figura 3 – Modelo de uma CI



Fonte: O Autor

Podem ser capazes de funcionar como um gerador substituto para casas e suprimento da rede durante períodos de pico.

3. **Medidor Inteligente:** Informações de preços de tarifas em tempo real. Aumento de opções para o consumidor.
4. **Eletrodomésticos Inteligentes:** Contém microcontrolador interno que se comunica com a rede elétrica. Sensores que detectam as condições de uso da rede e automaticamente desliga ou liga os eletroeletrônicos. Desta maneira, evita-se elevados picos de demanda de energia.
5. **Interfaces Gráficas de Usuário Inteligentes, *Smartphones* ou *in-Home Displays* (IHD):** Interfaces gráficas de interação com o consumidor, considerando informações como o consumo de energia por hora, corrente elétrica e monitoramento da energia limpa como eólica, solar, entre outros.
6. **Protocolo de Internet:** É necessário para controlar ou acessar informações do consumo da energia elétrica remotamente.
7. **Conexões de alta velocidade, sensores avançados, distribuídos por toda a rede elétrica e uma comunicação de alta velocidade, mantendo o sistema sempre conectado.**
8. **Termostato Inteligente:** Pode se comunicar com a rede elétrica e ajustar suas configurações para ajudar a otimizar o gerenciamento da demanda de energia.

A aplicabilidade do uso dessas tecnologias acarreta em benefícios como, a viabilidade do monitoramento, controle, comunicação dos dispositivos eletrônicos e medição na REI (DOLEZILEK; SCHWEITZER, 2013). A seguir são relacionadas as principais tecnologias utilizadas para adaptação de uma residência comum em CI.

2.2.1 Medição Eletrônica

Não se trata apenas dos medidores instalados nas residências, indústrias e comércio. Toda a medição envolvida, desde a geração até o consumidor final, faz parte dessa categoria. O controle de perdas, planejamento e operação da rede estão diretamente ligados a essa tecnologia (MME, 2010).

Os medidores inteligentes possibilitam uma mudança na interação entre o consumidor e a concessionária de energia elétrica. Os medidores convencionais de energia apresentam o montante de energia acumulado em um mês, porém um medidor inteligente pode informar ao usuário a demanda de energia elétrica a cada hora, em tempo real, ou em outro intervalo de tempo. Os dados medidos são periodicamente transmitidos para a concessionária. Esses medidores também podem monitorar a qualidade da eletricidade passando por eles e comunicar eventuais perturbações (afundamentos de tensão ou picos, distorções de forma de onda, etc.) ou interrupções de energia (WELLS, 2013). Com a introdução desse tipo de medidor, o consumidor passa a ter mais condições para gerenciar o seu consumo de energia.

2.2.2 Comunicação

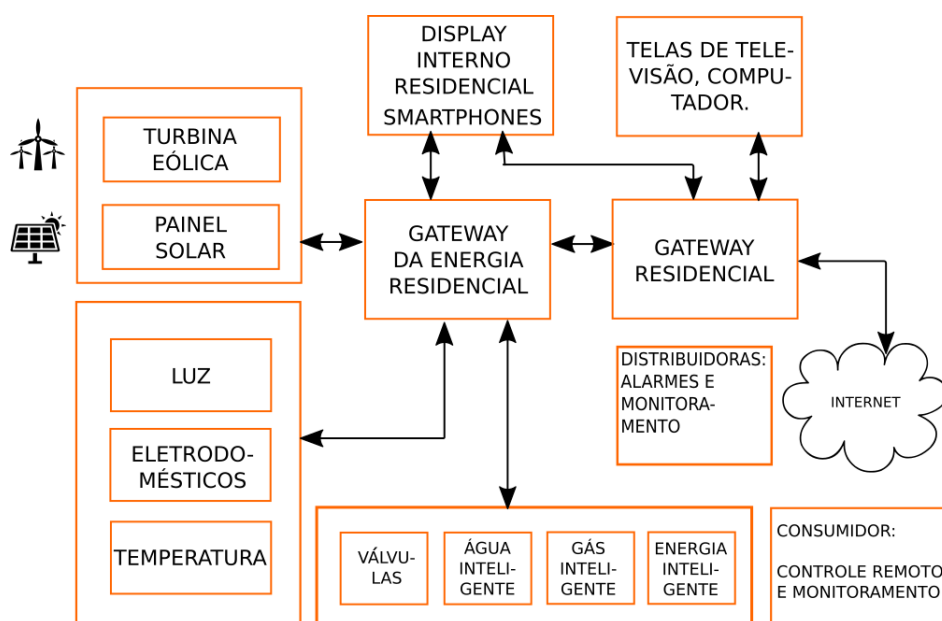
No Brasil, as tecnologias que permitem automação inteligente em subestações de transmissão no contexto de uma REI já se encontram em estágio avançado. São utilizados protocolos abertos, relativos às normas IEC 61850, e *Inter-Control Center Communications* (ICCP) em subestações e centros de controle, o que permite um grau de inteligência avançado na automação destes sistemas (POMILIO, 2012).

Já em residências, no geral, utiliza-se uma *Home Area Network* (HAN). É uma rede dedicada à conexão de dispositivos numa casa, como monitores, dispositivos de controle de carga e eletrodomésticos inteligentes agregados ao sistema de medição inteligente. Grande parte do uso de energia, atualmente, está relacionada com iluminação, arrefecimento, aquecimento, preparo de alimentos, lavagem e secagem de roupas.

Estes aparelhos domésticos estão começando a ser projetados com recursos de conectividade que lhes permitem ser automatizados, a fim de colher os benefícios que a medição inteligente e tarifas variáveis podem trazer (BALAKRISHNAN, 2011). A seguir são apresentados os dois principais padrões de comunicação integrados aos dispositivos tecnológicos comumente utilizados numa HAN.

Estes padrões são o ZigBee que é um padrão amplamente utilizado em casas e automação de edifícios, bem como para jogos e sensores médicos (TUNG et al., 2012) e o 802.11g/n. Este padrão tem entre suas características a facilidade de passagem através de paredes de concreto com uma velocidade de transmissão de dados relativamente alta (TUNG et al., 2012). Na Figura 4 é apresentado um modelo de uma HAN em que diferentes tipos de equipamentos, com interface de comunicação, interagem numa rede inteligente.

Figura 4 – Modelo de uma HAN



Fonte: Adaptado de Balakrishnan (2011)

Os dados em tempo real e gerenciamento ativo de rede exige uma comunicação digital bidirecional rápida com entidades terceiras.

As concessionárias de energia elétrica utilizam uma grande variedade de sistemas de telecomunicação, incluindo (KOTHARI; SINGH; SINGH, 2010): Com fio e sem fio, voz e dados de despacho de rádio, fibra ótica, linha de transmissão, satélite e a internet.

2.2.3 Sensoriamento

Numa REI, faz-se necessária a instalação de sensores ao longo de todo o sistema de distribuição de energia elétrica. Um dos benefícios previstos com o sensoriamento da rede é a recuperação automática da eletricidade (autorrecuperação) o que reduz a quantidade de consumidores prejudicados com a falta de energia. Os sensores são responsáveis por enviar as informações sobre o estado da rede elétrica para o centro de controle da concessionária possibilitando a tomada de decisão dos operadores da rede. Assim, o religamento de áreas não afetadas poderá ser feito mais rapidamente, eliminando o desconforto dos usuários e aumentando a receita (MME, 2010).

Utilizando a mesma estratégia, numa CI, as informações sobre as condições de operação podem ser enviadas para o controlador realizar ajustes. Fatores físicos como a temperatura, a pressão, a velocidade e a posição são convertidos por sensores em sinais elétricos digitais ou analógicos. Estes sinais são convertidos em dados que podem ser mostrados por uma interface visual de interação com o consumidor, bem como podem ser usados pelo controlador para tomar decisões com base em determinadas condições (SURAJ; BAJAJ; ROJA, 2014).

2.2.4 Computação

Devido à quantidade crescente de dispositivos utilizados numa REI, o processamento de dados recebidos por todos os equipamentos tende a aumentar substancialmente, por isso, torna-se necessário que os centros de controle das concessionárias sejam capazes de transformá-los em informações úteis para os operadores (MME, 2010).

Desse modo, os requisitos computacionais são divididos em operações aritméticas de sinais de entrada de dados de tempo, preparação de dados para periféricos de comunicação ou de saída, manipulação de rotinas associadas com a entrada irregular (tal como o pagamento, detecção de sabotagem), armazenamento de dados, atualizações de sistema e coordenação de diferentes funções (EKANAYAKE et al., 2012).

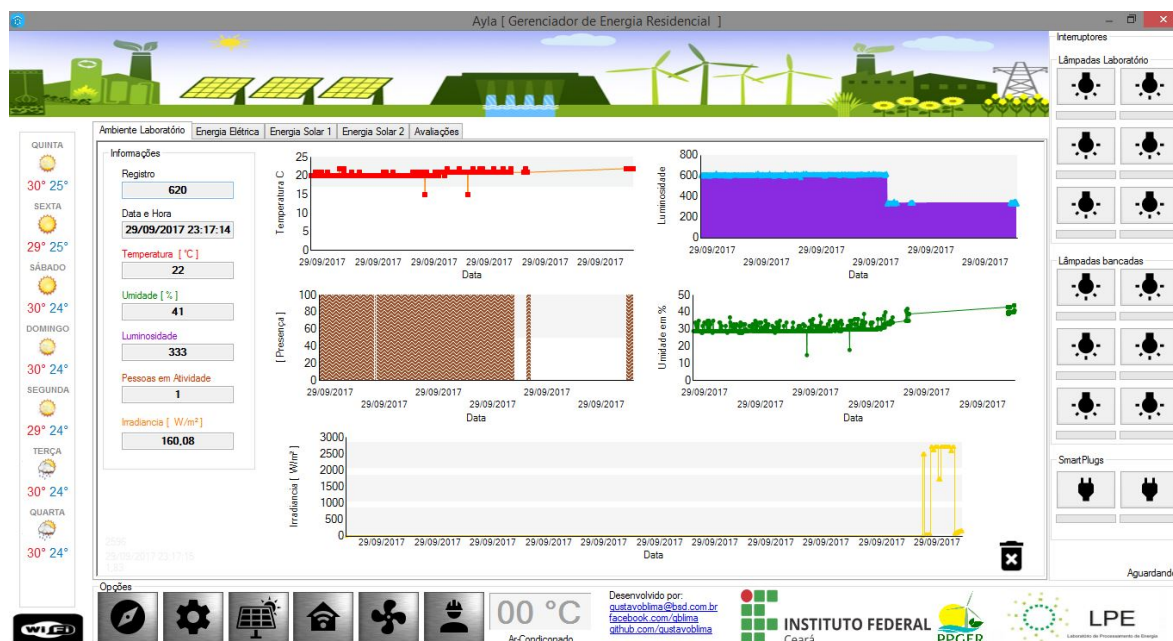
Portanto, para o controle do sistema elétrico de uma CI é necessário o auxílio de um computador, microcontrolador ou Controlador Lógico Programável (CLP). O controle é realizado por uma série de funções inerentes ao tempo como, por exemplo, a contagem, o processamento de dados, comparação, triagem e transferência, bem como operações aritméticas e lógicas. Alguns sistemas de automação permitem ao consumidor programar o sistema com a sua própria interface gráfica do usuário ou do inglês *Graphical User Interface* (GUI). Outros requerem a utilização de um computador separado (normalmente um PC) para programar o controlador do sistema, sendo necessário para desenvolver funções mais avançadas ou alterar certos parâmetros básicos de funcionamento de acordo com as necessidades do usuário (SURAJ; BAJAJ; ROJA, 2014).

No contexto da computação, em um sistema de automação de uma CI existem muitas opções possíveis para o sistema de automação e dispositivos individuais para serem controlados. Na Figura 5 é mostrada uma ilustração do software desenvolvido neste trabalho, no caso a GUI do sistema de gerenciamento de energia.

2.2.5 Eficiência Energética

Várias entidades e organizações nacionais e internacionais se comprometeram em tornar o uso da energia mais eficiente. A ANEEL por exemplo, possui o seu Programa de Eficiência Energética (PEE). Além disso, desenvolveu um guia de Medição e Verificação

Figura 5 – Exemplo do Software desenvolvido no LPE do IFCE



Fonte: O Autor

(M&V) que se baseia no Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP). O PIMVP (2012) foi criado por uma entidade chamada *Efficiency Valuation Organization* (EVO) responsável pela organização e treinamento dos profissionais.

Segundo a ANEEL (2015), quando se refere à eficiência energética, deve-se pensar como a energia que tem seu consumo evitado por meio de ações que potencializam o bom uso da eletricidade. Sobretudo, numa CI o uso de fontes alternativas de energia renovável em horários de pico, incluindo o uso de eletrodomésticos, iluminação e a instalação de sistemas de refrigeração mais eficientes podem reduzir significativamente o desperdício de energia elétrica.

Outra instituição vigente no país é o Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética (PROCEL Info) que instituiu no início dos anos 2000 o PROCEL EDIFICA.

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) promove o uso racional da energia elétrica em edificações desde sua fundação, sendo que, com a criação do PROCEL EDIFICA, as ações foram ampliadas e organizadas com o objetivo de incentivar a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais (água, luz, ventilação etc.) nas edificações, reduzindo os desperdícios e os impactos sobre o meio ambiente (PROCEL, 2006). Desse modo, foram criados selos para determinar o desempenho do uso de energia, com uma faixa de valores desde A (para mais eficiente) até E (para menos eficiente).

Já em países como Estados Unidos e Turquia existem programas de desempenho de energia que possuem o sistema de classificação de selo semelhante ao padrão disponibilizado pelo PROCEL. Porém, possuem características e métodos diferentes para se calcular e

classificar o nível de eficiência energética de uma casa. Nos Estados Unidos por exemplo, existe o *Home Energy Rating System* (HERS) que em português é conhecido como o índice do desempenho da eficiência energética em casas. Este índice foi desenvolvido por uma empresa conhecida como *Residential Energy Services Network, Inc.* (RESNET).

Contudo, uma avaliação da certificação de desempenho da eficiência energética realizada na Turquia por [Yigit e Acarkan \(2016\)](#), leva em consideração somente o aspecto do consumo de energia de acordo com a Equação 2.1.

$$E_{p,EP} = 100 \times \left(\frac{EP_a}{EP_r} \right), \quad (2.1)$$

em que:

E_p é o desempenho energético da casa;

EP é a quantidade do consumo primária de energia da casa (kWh/m^2 ano);

r é o consumo da casa de referência;

a é o consumo da casa real.

De acordo com os valores de E_p , a classificação de desempenho da eficiência de casas é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação do nível de eficiência da Turquia

Classificação de Energia	Abrangência da E_p
A	0-39
B	40-79
C	80-99
D	100-119
E	120-139
F	140-174
G	175-...

Fonte: Adaptado de ([YIGIT; ACARKAN, 2016](#))

Este método de avaliação da eficiência adotado na Turquia foi implantado no sistema supervisorio proposto neste trabalho e utilizado na valiação dos testes realizados em laboratório.

2.2.6 Conforto do Ambiente

O uso de um Sistema de Gerenciamento de Energia (SGE) numa CI possibilita a implantação de diferentes estratégias com os objetivos de economizar energia, aumentar a eficiência e melhorar o conforto ambiental para os ocupantes ([SHAIKH et al., 2013](#)).

Na literatura existem diversos estudos direcionados ao campo do conforto ambiental. No entanto, quando se trata de um ambiente de uma CI, além da comodidade das informações do preço de energia fornecidas por meio do gerenciamento, utilizando um IHD e automação do ambiente por meio dos recursos empregados como sensores e atuadores,

existem outros tipos de conforto que também podem ser determinados como opções de uso do consumidor. Um exemplo seria os dois outros tipos de conforto, são eles: Os confortos térmico e visual.

O conforto térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. Se o balanço de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo for nulo e a temperatura da pele e suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que o consumidor sente conforto térmico ([ASHRAE, 2005](#)).

O conforto visual é um importante fator a ser considerado na determinação da necessidade de iluminação em uma CI. A boa iluminação deve ter direcionamento adequado e intensidade suficiente sobre o local de trabalho, bem como proporcionar a boa definição de cores e ausência de ofuscamento ([LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2005](#)).

2.2.7 Viabilidade de Uso

Várias aplicações podem ser identificadas em torno de quatro principais áreas: segurança, eficiência energética, conforto ambiental e cuidados com a saúde ([LIONEL, 2012](#)). O conceito de CI possibilita aos usuários se conectar, controlar e monitorar todos os aparelhos e informações da casa por meio de uma GUI simples e intuitiva.

Os eventos domésticos se tornam recursos domóticos amplamente utilizados, tais como detecção de movimento, abertura de portas, ou quedas de energia, podem também ser armazenados localmente ou na nuvem. Um portal eletrônico permite que as portas dos consumidores sejam bloqueadas ou desbloqueadas remotamente ([LIONEL, 2012](#)).

Os sistemas de detecção de incêndio também podem ser integrados numa CI. Hoje, a instalação de detectores de fumaça conectáveis, usando protocolos de comunicações específicos, permite ao consumidor ser notificado remotamente quando houver uma detecção de anormalidades ([LIONEL, 2012](#)).

Na eficiência energética, o gerenciamento de energia se concretiza, principalmente sobre o monitoramento e controle da energia renovável e o uso adequado da energia armazenada. A redução dos custos da fatura mensal de energia também é um benefício que uma CI proporciona ao consumidor por meio da utilização de algoritmos de gerenciamento que estabeleça medidas que reduzam o consumo de energia.

A área do conforto, abrange soluções que permitem o controle das condições ambientais da CI. Estes incluem aquecimento, ventilação e ar-condicionado, controle de iluminação, controle de persianas, e irrigação de jardins. O objetivo é possibilitar o controle centralizado do ambiente de uma CI tão simples quanto possível a partir de uma única plataforma. Iluminação ou janelas controladas proporcionam mais conforto ao consumidor ([LIONEL, 2012](#)).

2.3 ARQUITETURAS DE COMUNICAÇÃO

Os protocolos de comunicação são os procedimentos utilizados por sistemas de automação em CI para a comunicação entre os dispositivos que possuem a capacidade de funcionar como “controlador”. Os protocolos podem ser abertos com o seu padrão disponível de forma gratuita para utilização (VEGA; SANTAMARIA; RIVAS, 2015).

No mercado, existem muitos padrões de comunicação para uso na automação de uma CI. Os principais protocolos utilizados nos quatro processos do setor elétrico (geração, transmissão, distribuição e o consumidor final) estão relacionados com o modelo *Open Systems Interconnection* (OSI).

O WiFi é utilizado por produtos que pertencem à classe de dispositivos de uma rede local sem fios ou de uma rede mista que opera em faixas de frequências que não necessitam de licença para instalação e/ou operação, sendo permitidos apenas equipamentos com certificado de homologação. As vantagens da utilização são os espaços onde o cabeamento não pode ser estruturado, como áreas ao ar livre e edifícios históricos. Possui conexão rápida, proteção por meio de criptografia dos dados para PC, laptop e dispositivos móveis.

O preço dos circuitos WiFi estão cada vez mais baixos, trazendo uma opção de rede econômica e passando a integrar produtos e eletrodomésticos de uma CI com muito mais frequência. É um padrão da família IEEE 802.11 para a rede local HAN sem fio e suas versões são a 802.11g e 802.11n.

2.3.1 Protocolos de Comunicação

A seguir são apresentados os principais protocolos de comunicação utilizados em uma CI.

- **802.11g:** É o terceiro padrão de modulação para *Wireless LAN* ou (WLAN). Ele funciona na faixa de 2,4 GHz (como o 802.11b), mas opera a uma taxa de dados máximo de 54 Mbit/s, ou cerca de 22 Mbit/s para taxas de transferência. Quando se trata do produto final o hardware 802.11g é compatível com hardware 802.11b (TUNG et al., 2012).
- **802.11n:** É uma alteração que melhora os padrões 802.11 anteriores, adicionando o método de transmissão de múltiplas entradas e múltiplas saídas capaz de aumentar consideravelmente as taxas de transferência de dados por meio da combinação de várias vias de transmissões (antenas) (ALECRIM, 2008). O padrão 802.11n opera em frequências de 2,4 GHz ou 5 GHz. A popularidade do WiFi baseia-se no bom desempenho. Portanto, ele é adequado para a transmissão de dados em uma CI (TUNG et al., 2012).

- **ZigBee:** É um outro padrão IEEE 802.15.4 que possui alguns atributos comuns com *Bluetooth*, tais como transmissão de curto alcance, baixo custo de produção, baixa taxa de dados e baixo consumo de energia. Para efeito de comparação, o ZigBee gasta menos energia do que *Bluetooth*, sendo uma boa solução para pacotes menores em uma grande rede. A vida útil do ZigBee pode durar anos e é especialmente adequada para domótica. Operando com mais de 65.000 dispositivos, uma rede ZigBee é amplamente utilizada em CI e automação predial (TUNG et al., 2012).
- **X10:** Os produtos X10 são a base da automação em uma CI, sendo adequado para os usuários finais, instaladores, prestadores de serviços e do mercado *do-it-yourself* (X10, 2015).
- **Konnex:** Para transferir os dados de controle a todos os componentes de gerenciamento de uma CI, é necessário um sistema que elimine os problemas de dispositivos isolados. Assim, todos os componentes podem se comunicar por meio de uma linguagem comum, ou seja, integrando diferentes fabricantes e aplicações. Com o uso do protocolo Konnex, todos os dispositivos da rede se conectam e são capazes de trocar informações via par trançado, frequência de rádio, linha de energia ou IP/Ethernet. Os dispositivos conectados a este barramento podem ser sensores e atuadores (KNX, 2016).
- **BACnet:** O desenvolvimento do BACnet/IP foi desafiador, pois proporcionou não só a especificação para o transporte de mensagens BACnet entre dispositivos IP, mas também uma estrutura para abranger outras novas tecnologias de rede com um impacto mínimo sobre a tecnologia BACnet existente. Com a utilização deste protocolo se torna possível a interligação de produtos manufaturados por diferentes fabricantes sem um protocolo padrão. Ao longo dos anos, foi desenvolvido um *software front-end* comum que interage com múltiplos canais de comunicação *drivers*, um para cada tipo de rede de comunicação (BACNET, 2015).
- **Jini:** A tecnologia Jini fornece mecanismos simples que permitem que os dispositivos sejam conectados em conjunto para formar uma comunidade sem qualquer planejamento, instalação ou intervenção humana. Estes dispositivos fornecem suas próprias interfaces, o que garante confiabilidade e compatibilidade (JINI, 2016).
- **LonWorks:** Os benefícios para os fornecedores de produtos que usam a plataforma *LonWorks* são diversos. É baseado em padrões de protocolos de comunicação ágeis, incluindo o ciclo de vida para o usuário final. Além disso, este protocolo dispõe da adoção mais rápida de dispositivos interoperáveis com vários fornecedores para a construção de sistemas de automação (LONWORKS, 2016).

2.4 INTERNET DAS COISAS - IoT

Considerando o impacto que a *Internet* tem na educação, na comunicação, na ciência e na humanidade, a Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) surgiu para fazer a junção dos objetos inteligentes físicos com objetos do mundo virtual disponíveis na *Internet* com o intuito de promover a comunicação entre usuário e os dispositivos. Essa extensão proporciona a integração dos objetos usuais do cotidiano no âmbito da domótica, automação e *Internet*.

Alguns autores como Ashton (2009) e Wang et al. (2015), descrevem que a IoT será a nova revolução tecnológica. Os principais componentes desta revolução tecnológica estão relacionados com a digitalização crescente dos conteúdos, o aumento da capacidade de transmissão de dados por redes sem fio, a miniaturização dos sensores/processadores e a redução dos preços de todas essas tecnologias. Além disso, é fundamental que a IoT disponibilize um *software* capaz de gerenciar não apenas a conexão, como também a troca de dados com outros dispositivos. Portanto, é necessário criar protocolos para garantir o máximo proveito da estrutura disponibilizada.

Em IoT o ambiente e os itens comuns são conhecidos como “coisas”, “objetos” do inglês “*things*”, “*objects*”, ou “computadores”, os quais são aprimorados a cada dia, com tecnologias de computação e comunicação que juntas formam uma estrutura de interação entre seus componentes (CHAOUCHI, 2010). Diante disso, a IoT deve ser compreendida como um meio para alcançar a onipresença da informática no cotidiano das pessoas.

2.4.1 Elementos Básicos

Na Figura 6 são apresentados os elementos básicos de construção da IoT que possibilitam a integração dos objetos inteligentes com os objetos do mundo virtual. A seguir é apresentada a descrição de cada uma dos elementos básicos.

- **Identificação:** É fundamental identificar os objetos para poder se conectar à *Internet*. Como identificação de objetos de tecnologia, tem-se: RFID, *Near Field Communication* (NFC) e endereçamento IP.
- **Sensores/Atuadores:** É a coleta de informações do ambiente ao seu redor. Como também, a manipulação do ambiente de acordo com os dados obtidos.
- **Comunicação:** Por meio desse elemento é possível fazer a interação dos objetos inteligentes. Como exemplo: WiFi, *Bluetooth*, RFID.
- **Computação:** É a possibilidade dos objetos inteligentes fornecerem a capacidade computacional, por meio de processadores, microcontroladores, etc.

Figura 6 – Elementos básico da IoT



Fonte: Adaptado de [Al-Fugaha et al. \(2015\)](#)

- **Serviços:** É a capacidade de mapear objetos de mundo real com os respectivos objetos virtuais.
- **Semântica:** É a habilidade de utilizar recursos de forma inteligente para possibilitar a organização de determinado serviço. Também serve para analisar os dados que influenciam na tomada de decisões. Para fazer uso deste elemento, são utilizadas tecnologias, como: *Resource Description Framework* (RDF), *Web Ontology Language* (OWL) e *Efficient XML Interchange* (EXI).

2.4.2 Plataformas para IoT

Diante dos avanços tecnológicos, surgiram plataformas para IoT para solucionar, de forma promissora, a capacidade do sistema de se comunicar de forma transparente, gerenciando os usuários e os dispositivos. Tais plataformas são inseridas entre as aplicações e a infraestrutura (de comunicação, de processamento, de sensoramento e de atuação) subjacente, provendo um meio padronizado para o acesso aos dados e serviços fornecidos pelos objetos ([BANDYOPADHYAY et al., 2011](#)).

São considerados microcontroladores (objetos) utilizados para integração das plataformas físicas para o gerenciamento local e *web* no IoT: Arduino, Raspberry, BeagleBone, Intel Edison, PandaBoard e Intel Galileo.

São consideradas plataformas lógicas para uso do IoT na *web* e integradas por meio das plataformas físicas de microcontrole: *mbed.com*, *microsoft.com/iot*, *opensensors.io*, *pubnub.com*, *sensorcloud.com*, *sensorflare.com*, *thingspeak.com*, *aws.amazon.com/iot*, *xively.com*, *carriots.com*, *bluemix.net*.

2.4.3 Visão geral da aplicação da tecnologia IoT

O projetista do sistema deve considerar os protocolos de comunicação. Primeiramente, as funcionalidades da conectividade para os sistemas IoT são definidas. Embora tenham surgido vários tipos de protocolos de comunicação, visando a interoperabilidade entre diferentes tecnologias e utilizando o IP como denominador comum, o projetista do sistema pode ser forçado a fazer escolhas de baixa qualidade. No entanto, são identificadas as seguintes possibilidades (AL-FUGAHA et al., 2015):

- Conjunto de protocolos padronizados para IoT - esta é a melhor solução para interoperabilidade.
- Soluções *ad-hoc* proprietárias - sempre que os requisitos de desempenho da aplicação forem mais importantes que a versatilidade do sistema, soluções *ad-hoc* podem ser a única direção a seguir.
- Objetos inteligentes - esta escolha se aplica à definição de recursos e serviços leves tais como serviços *Web*, que podem ser realizados em algumas dezenas ou centenas de *bytes*, por exemplo.
- *Gateways* - são dispositivos que habilitam a comunicação entre diferentes arquiteturas e ambientes. Geralmente, funcionam como uma máquina intermediária destinada a interligar redes de comunicação.
- Nuvens computacionais - um sistema IoT também pode ser implantado em nuvens computacionais. Apesar da solução aumentar a disponibilidade dos serviços, ela pode diminuir o desempenho em termos de latência e taxa de transferência.
- Somente local (HAN) - os dados são armazenados somente no dispositivo que o produziu. Neste caso, a localidade dos dados é imposta e o sistema não requer um complexo banco de dados distribuído. Todavia, dependendo da localização de uma requisição, a resposta pode levar muito tempo para ser entregue e, no pior cenário, pode ser perdida.
- Somente *Web* - nenhuma cópia local é mantida pelo dispositivo, de modo que tão logo os dados sejam enviados para o servidor, eles são armazenados em banco de dados.
- Local com *cache Web* - uma estrutura hierárquica para armazenar dados é mantida a partir dos dispositivos até os servidores de banco de dados.
- Implantação interna - o módulo principal ou um programa instalado nos servidores pertencentes ao sistema, sendo dedicado para a aplicação alvo ou compartilhado entre diferentes aplicações do mesmo provedor.

- Uso externo - o motor principal é fornecido por terceiros e o projetista deve construir Aplicações de Interfaces (APIs) de acesso para esse serviço.

2.5 REDES DE PETRI

Sistemas são definidos fisicamente como uma parte limitada do universo, sujeito à observação imediata ou mediata, e que, em geral, podem se caracterizar por um conjunto finito de variáveis associadas à grandezas físicas que o identificam univocamente. Em um contexto mais geral, sistemas são conjuntos de elementos, materiais ou ideais, entre os quais se possa encontrar ou definir alguma relação, ou a disposição das partes ou dos elementos de um todo, coordenados entre si, e que funcionam com estrutura organizada (COSTA, 2011).

Um Sistema a Eventos Discretos (SED) é definido como um sistema cuja evolução dinâmica depende da ocorrência de eventos. Um evento pode ser identificado com uma ação proposital (ligar um interruptor), uma ocorrência espontânea (perda de conexão com o provedor de *Internet*) ou o resultado da verificação de uma condição (a temperatura do reator excedeu o limite de segurança). Os eventos produzem mudanças de estado e, de modo geral, ocorrem em instantes de tempo irregulares (COSTA, 2011).

Atualmente, o funcionamento dos sistemas modernos apresentam concorrência e paralelismos, quando submetidos a estudos detalhados precisam ser analisados a partir de referências qualitativas e quantitativas. A análise qualitativa está focada nas propriedades como a ausência de bloqueios (*deadlocks*), a ausência de armazenadores (*overflows*), ou a presença de certas exclusões mútuas na utilização de recursos compartilhados durante o funcionamento deste sistema. O objetivo é demonstrar a veracidade do sistema modelado. A análise quantitativa procura por propriedades de desempenho, capacidade de resposta, os tempos médios de conclusão ou propriedades de utilização por exemplo, comprimentos de fila ou taxas de utilização. Em outras palavras, a análise quantitativa é uma avaliação da eficiência do sistema modelado (COSTA, 2011).

As Redes de Petri (RP) possibilitam a construção de modelos passíveis tanto para correção como para análise de eficiência. Além disso, podem ser implementadas utilizando diversas técnicas como em *hardware*, microprogramadas e *software*. Devido à natureza gráfica dos modelos da rede, são especificações na sua maioria auto-documentada, tornando mais fácil a comunicação entre os projetistas e usuários (CARDOSO; VALETTE, 1997).

2.5.1 Fundamentos

Uma RP possui características que incluem condições explícitas sob o qual um evento pode ser ativado. Também, permite a representação de um SED em que a operação depende de regimes de controle potencialmente complexos. Esta representação é descrita

graficamente, pelo menos para pequenos sistemas, resultando em gráficos de uma RP. Este gráficos em RP são intuitivos e podem capturar várias informações sobre a estrutura do sistema. Outra motivação para considerar modelos RP de um SED é com corpo de técnicas de análise que têm sido desenvolvido para estudá-los ([CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008](#)).

Como uma ferramenta gráfica, as RP podem ser utilizadas como uma ajuda de comunicação visual semelhante aos gráficos de fluxo convencionais, de diagramas, de blocos e redes. Além disso, marcadores são usados nestas redes para simular as atividades simultâneas e dinâmicas de sistemas. Como ferramenta matemática, é possível configurar equações de estado, equações algébricas e outros modelos matemáticos que regem o comportamento dos sistemas ([MURATA, 1989](#)).

Entre as aplicações, podem-se citar: avaliação de desempenho, análise e verificação formal em sistemas discretos, protocolos de comunicação, controle de oficinas de fabricação, concepção de software tempo real e/ou distribuído, sistemas de informação (organização de empresas), sistemas de transporte, logística, gerenciamento de base de dados, interface homem-máquina e multimídia ([CARDOSO; VALETTE, 1997](#)). As vantagens de utilização da modelagem de um sistema RP são:

- Excelente visualização de dependências de sistemas.
- Abordagens de modelagem do tipo refinamento (*top-down*) e do tipo composição modular (*bottom-up*).
- Uma família de ferramentas é utilizada por meio de especificações, da modelagem, da análise, da avaliação do desempenho e da implementação.
- Os estados, bem como eventos são representados explicitamente.
- Facilidade para modelar as características de um SED como concorrências, sincronismo e assincronismo, conflito, exclusão mutua, relações de precedência, não determinismo e bloqueio.
- Possibilidade de gerar o código de controle supervisorio diretamente de sua representação gráfica.
- Possibilidade de testar propriedades indesejáveis para os sistemas, tais como bloqueio e reinicialização.
- uma descrição precisa e formal das sincronizações se torna possível, o que é essencial para se alcançar a necessária segurança de funcionamento.
- Simulação dos eventos discretos diretamente a partir do modelo.

2.5.2 Características

Segundo [Cardoso e Valette \(1997\)](#), a evolução dos processos num sistema pode se dar de forma simultânea ou não. Existem diferentes formas de interação entre processos. Os conceitos básicos utilizados na modelagem de um sistema baseada numa abordagem por eventos discretos são os seguintes:

- **Eventos:** são os instantes de observação e de mudança de estado do sistema.
- **Atividades:** são as caixas-pretas utilizadas para recuperar e esconder a evolução do sistema físico entre dois eventos. Portanto, os eventos correspondem em geral ao início e ao fim de uma atividade.
- **Processos:** são sequências de eventos e de atividades interdependentes. Por exemplo, um evento provoca uma atividade, que provoca um evento de fim de atividade, que por sua vez pode provocar uma outra atividade e assim por diante.

2.5.3 Elementos de uma RP

As RP têm uma estrutura de um grafo ponderado, direcionado e bipartido, e apresentam uma marcação inicial. O conceito de grafo bipartido define que uma RP possui dois tipos de nós, os quais são denominados lugares e transições. O termo grafo direcionado determina a existência de arcos, os quais são direcionados sempre de um lugar para uma transição e de uma transição para um lugar ([COSTA, 2011](#)). Os elementos básicos que permitem a definição de uma RP são os seguintes:

- Lugar (representado por um círculo ou elipse): pode ser interpretado como uma condição, um estado parcial, uma espera, um procedimento, uma quantidade de recursos, etc.
- Transição (representada por barra, retângulo ou quadrado): é associada a um evento que ocorre no sistema, como o evento ligar uma lâmpada.
- Ficha (representado por um ponto (•) ou número inteiro num lugar): é um indicador significando que a condição associada ao lugar é verificada. Pode representar um objeto (num determinado estado) ou ainda uma estrutura de dados que se manipula.

2.5.4 Definição

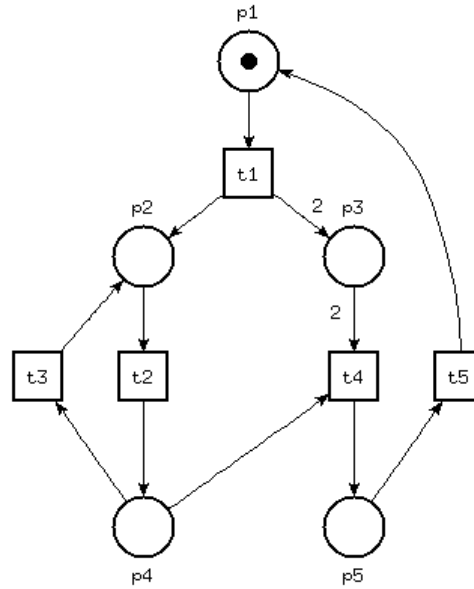
Formalmente, uma RP é definida como uma quintupla, $RP = (P, T, A, W, M_0)$, em que ([COSTA, 2011](#)):

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ é um conjunto finito de lugares;

- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ é um conjunto finito de transições;
- $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ é um conjunto finito de arcos;
- $W : A \rightarrow \{1, 2, \dots\}$ é a função peso associada aos arcos;
- $M_0 : P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ é a marcação inicial.

Na representação gráfica a existência de múltiplos arcos conectados a lugares e transições podem ser realizadas por um único arco rotulado por seu peso. Na Figura 7 é mostrado um exemplo de RP.

Figura 7 – Exemplo de uma RP



Fonte: O autor

2.5.5 Dinâmica de uma RP

A evolução dinâmica de uma RP é determinada por disparos de transições habilitadas em determinadas marcações. Esses disparos podem modificar as marcações da rede. Segundo Costa (2011), para lugares p_i , que contém um número n_i de fichas e habilitada uma transição t , se esta transição dispara, há uma redução de fichas no número de fichas do lugar p_i para $n_i - w(p_i, t)$, com $w(p_i, t)$ sendo o peso do arco que liga p_i a t . Se há um lugar p_j com n_j fichas, sendo lugar de saída da transição t , então uma quantidade de fichas em p_j é aumentada para $n_j + w(p_j, t)$, em que $w(p_j, t)$ é o peso do arco ligando t a p_j . A evolução dinâmica de uma RP é formalizada por meio de algumas regras apresentadas a seguir:

1. Uma transição t é dita estar habilitada (pronta para disparar) em uma marcação $M(p)$ se e somente se

$$\forall p \in P \text{ que é entrada de } t : W(p, t) \leq M(p)$$

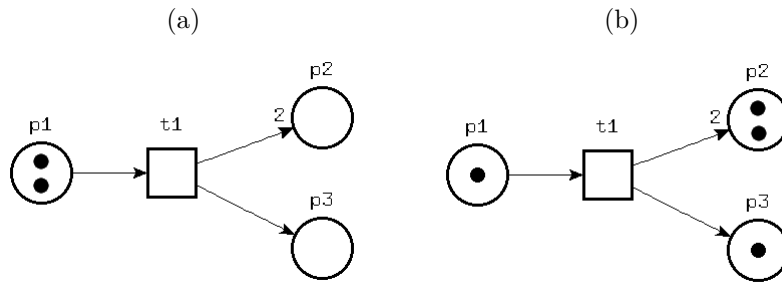
$$\forall p \in P \text{ que é saída de } t : M(p) \leq K(p) - W(t, p)$$

2. Uma transição habilitada pode ou não disparar;
3. O disparo de uma transição $t \in T$, habilitada na marcação $M(p)$, é instantânea e resulta em uma nova marcação $M'(p)$ da rede dada pela equação:

$$M'(p) = M(p) - W(p, t) + W(t, p), \quad \forall p \in P$$

Na Figura 8(a) é mostrada uma RP com marcação inicial $M_0 = [2 \ 0 \ 0]^T$ e sua nova marcação (b), após o disparo da transição $t1$. A marcação após o disparo é $M_1 = [1 \ 2 \ 1]^T$.

Figura 8 – Disparo de uma transição numa RP.



Fonte: O autor

2.5.6 Análise da RP

O grafo de alcançabilidade de uma RP é representado por $G = (V, E)$ que apresenta todas as possíveis marcações a partir da marcação inicial M_0 , bem como todos os possíveis disparos a partir de cada marcação, sendo V um conjunto de marcações alcançadas e E um conjunto de transições disparáveis na rede. Uma marcação M_n é alcançável a partir de M_0 , se existe uma sequência de disparo s que transforma M_0 em M_n . De fato, o grafo de marcações acessíveis é a máquina de estados equivalente à RP (CARDOSO; VALETTE, 1997).

Assim, se a RP é ilimitada (capacidade infinita), o grafo de alcançabilidade tende a crescer infinitamente para poder representar todo o conjunto de marcações alcançáveis (COSTA, 2011). Esta forma de análise permite avaliar mudanças de marcações seguindo uma determinada sequência, além de ser útil na verificação do comportamento

geral da rede, em que é possível avaliar se a mesma representa bloqueios ou outras situações não desejadas em busca de melhoras na sua estrutura.

As RP apresentam determinadas propriedades, cujo estudo possibilita analisar várias características e problemas associados aos sistemas concorrentes. Essas propriedades são classificadas em propriedades comportamentais e propriedades estruturais. As propriedades comportamentais são as características relacionadas à evolução dinâmica da rede. As propriedades comportamentais dependem da marcação inicial da RP. Já as propriedades estruturais independem da marcação inicial (COSTA, 2011). As principais propriedades comportamentais das RP são (CARDOSO; VALETTE, 1997; DIAZ, 2009; COSTA, 2011):

- Alcançabilidade: Uma marcação M_n é alcançável a partir da marcação inicial M_0 , se existir uma sequência de disparos s que transforma M_0 em M_n ;
- Limitação: Um lugar p_i é limitado para uma marcação inicial M_0 se existe um número natural k , tal que para toda marcação M acessível a partir de M_0 , o número de fichas em p_i é inferior ou igual a k ;
- Vivacidade: O conceito de vivacidade relaciona-se com a ausência de bloqueios. Uma RP é viva se em qualquer marcação alcançada a partir da marcação inicial M_0 , sempre houver a possibilidade de disparar qualquer transição da rede, por meio de uma sequência de disparos de transições. Assim, uma RP viva garante uma operação livre de bloqueios;
- Reversibilidade: Garante que uma RP sempre pode alcançar seu estado inicial, por meio de uma sequência qualquer de disparos de transições, a partir de uma determinada marcação.

Durante o desenvolvimento do sistema de gerenciamento de energia os algoritmos para o funcionamento automático da CI foram implantados no sistema supervisor, o qual possui o processamento de tarefas concorrentes. Dessa forma, a ferramenta *Time petri Net Analyzer* (TINA)¹ foi utilizada na criação, simulação e análise dos modelos RP desses algoritmos. Os resultados dessa modelagem são apresentados no Capítulo 4.

Para o modelo RP mostrado na Figura 7, a ferramenta TINA forneceu os seguintes resultados de análise:

```

Marcações (estados): 4
0 : p1
1 : p2 p3*2
2 : p3*2 p4
3 : p5

```

¹ <http://projects.laas.fr/tina/>

Grafo de alcançabilidade:

0 $\rightarrow$ t1/1

1 $\rightarrow$ t2/2

2 $\rightarrow$ t3/1, t4/3

3 $\rightarrow$ t5/0

Propriedades da RP: limitada, viva e reversível.

2.6 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar tem sido utilizada em diversas áreas da ciência com a proposta de reduzir a demanda sobre seus recursos energéticos e os impactos sobre o meio ambiente. É uma energia limpa e inesgotável, sendo distribuída ao longo do globo terrestre.

Para tanto, diferentes células Fotovoltaicas (FV) foram inventadas, cada uma com suas vantagens de custo (tipo de material e processo de fabricação utilizados) e eficiência (WALKER, 2013).

2.6.1 Sistemas FV

A geração de eletricidade a partir da radiação do Sol é um processo conhecido como geração de energia solar FV. Esse sistema de geração é uma fonte confiável e livre de poluição. Os projetos nessa área incluem: Bombeamento de água, abastecimento doméstico, irrigação, piscicultura, iluminação pública, sistemas de uso coletivo, tais como eletrificação de escolas e atendimento domiciliar (PINHO; GALDINO, 2014).

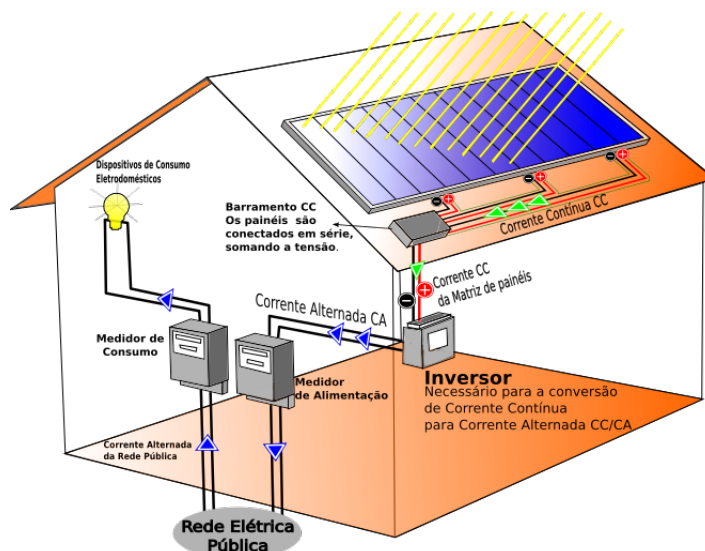
A quantidade de energia que pode ser gerada por um sistema FV num determinado lugar depende da quantidade de radiação solar que atinge esse local. Como todas as tecnologias solares, pode funcionar de forma mais eficiente em lugares que possui baixas formações de nuvens. Mesmo assim, os sistemas FV são capazes de produzir energia nos dias nublados, mas não tanto como num dia ensolarado. Os sistemas FV podem ser classificados em duas categorias principais: conectados à rede e sistemas isolados (PINHO; GALDINO, 2014).

- Sistemas Conectados à Rede

Sistemas conectados à rede (*On-Grid*) são aqueles em que a potência produzida pelo sistema FV é entregue diretamente à rede elétrica. Para tanto, é indispensável que se utilize um inversor de frequência que satisfaça as exigências de qualidade e segurança do sistema elétrico ao qual se interliga o sistema FV. Esses sistemas FV foram incluídos na regulamentação disposta pela ANEEL, através da Resolução 687/2015, que estabeleceu

preliminarmente as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Na Figura 9 é apresentado um modelo de uma casa com geração solar FV conectada à rede elétrica.

Figura 9 – Sistema FV Conectado a Rede



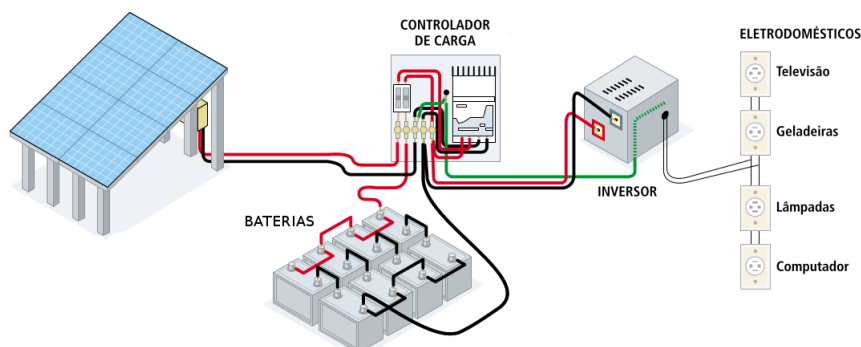
Fonte: Adaptado de Wells (2013)

Nesses sistemas qualquer excesso de energia elétrica produzida é fornecido para a rede elétrica da concessionária. Utilizando um medidor bidirecional, instalado pela concessionária de energia, o consumidor deverá pagar apenas a diferença entre as energias consumida e fornecida durante cada mês (WELLS, 2013).

- Sistemas Isolados

Os sistemas isolados (*Off-Grid*) são frequentemente escolhidos para consumidores localizados em áreas remotas onde a ligação à rede elétrica pública não está disponível (WELLS, 2013). Na Figura 10 é mostrado o modelo básico de um sistema FV isolado.

Figura 10 – Sistema FV Isolado



Fonte: Adaptado de ANEEL (2005)

Sistemas isolados, em geral, necessitam de algum tipo de armazenamento. O armazenamento pode ser em baterias, quando se deseja utilizar aparelhos elétricos nos períodos sem geração solar FV, ou em outras formas de armazenamento de energia. A utilização de baterias também proporciona uma referência de tensão elétrica contínua para os inversores utilizados na rede elétrica de tensão alternada do sistema isolado.

Estes sistemas podem ser bastante eficientes se empregarem uma combinação de tecnologias de geração de energia, adotando técnicas para reduzir as necessidades de energia elétrica residencial. Essas estratégias incluem a instalação de sistemas de geração híbrida (solar e eólica), ter um sistema de *backup* de emergência alimentada com combustível, um sistema de gerenciamento dos eletrodomésticos e escolha da fonte de energia (ABINEE, 2012). Os componentes de um sistema FV isolado são (PINHO; GALDINO, 2014; ENEL, 2014):

- Conversor CC/CA: A maioria das cargas são projetadas para trabalhar em corrente alternada. O conversor CC/CA ou inversor é um dispositivo eletroeletrônico que converte um sinal elétrico em corrente contínua (CC) para um sinal elétrico em corrente alternada (CA).
- Controlador de carga: Dispositivo responsável por regular e gerenciar o fluxo energético do gerador FV para as baterias, bem como protegê-las de uma descarga profunda decorrente de um longo período sem geração.
- Sistema de armazenamento: Sistema responsável por acumular energia elétrica, para a distribuição no momento oportuno e na medida requerida. Em sistemas FV isolados o uso de dispositivos de armazenamento de energia é necessário para atender a demanda em períodos nos quais a geração FV é nula ou insuficiente.

O Estado de Carga (SoC) de uma bateria é a capacidade remanescente disponível em uma bateria ou célula em determinado momento, expressa como percentagem da capacidade nominal. A Equação 2.2 é utilizada para o cálculo do SoC de uma bateria.

$$SoC(\%) = 100 \times \frac{CapacidadeRemanescentenaBateria(Ah)}{CapacidadeNominaldaBateria(Ah)} \quad (2.2)$$

Um SoC de 100 % indica bateria totalmente carregada enquanto que 0 % indica totalmente descarregada. Por exemplo, se 25 Ah foram retirados de uma bateria de capacidade nominal de 100 Ah completamente carregada, o novo estado de carga é 75 %.

- Cargas consumidoras: São os dispositivos e aparelhos que consomem energia elétrica, tais como: Iluminação, aquecimento, climatização, eletrodomésticos, etc.

2.6.2 Monitoramento de Sistemas FV

A instalação de um sistema FV isolado em regiões geralmente remotas e a dificuldade em se detectar uma perda de desempenho ou uma falha num sistema FV conectado à rede, em função de operar paralelamente à rede elétrica, são condições que tornam desejáveis a instalação de sistemas de supervisão e controle e de registro dos dados (sistemas de aquisição e armazenamento de dados), para que eventos indesejáveis possam ser detectados mais rapidamente (WOYTE et al., 2013; PINHO; GALDINO, 2014).

Sistemas de aquisição e armazenamento de dados podem permitir somente a coleta manual dos dados no local ou, o que é mais indicado na maioria das aplicações, podem estar conectados a um sistema de transmissão remota, que envia, de forma automática e periódica, os dados coletados para um computador do responsável pela operação e manutenção do sistema, via satélite, internet ou rede de dados móveis (celular). Dessa forma, este sistema integrado pode apresentar ao operador, mesmo estando distante do local de instalação, dados em tempo real do desempenho do sistema, para que situações indesejadas sejam detectadas e solucionadas o mais rápido possível (PINHO; GALDINO, 2014).

Para isso, são usados transdutores de tensão e corrente e registradores de dados (*dataloggers*). Os dados elétricos monitorados na maior parte das aplicações são tensão, corrente, potência ativa e energia ativa, tanto no lado CC quanto no lado CA. Grandezas meteorológicas como irradiância no plano horizontal ou no plano de instalação do gerador FV, e as temperaturas, ambiente, da superfície traseira do módulo fotovoltaico e do banco de baterias são normalmente medidas pelo sistema de aquisição e armazenamento de dados, para conferir maior qualidade e precisão à monitoração (PINHO; GALDINO, 2014).

Neste trabalho, foram monitoradas os parâmetros irradiância solar, tensão, corrente e potência nos painéis FV. Nos bancos de baterias foram monitorados tensão, corrente e o estado de carga.

2.7 SISTEMAS SUPERVISÓRIOS

Os sistemas supervisórios permitem que sejam monitoradas e rastreadas informações de um processo produtivo ou instalação física. Estas informações são coletadas por meio de equipamentos de aquisição de dados e, em seguida, manipuladas, analisadas, armazenadas para, posteriormente, serem apresentadas ao usuário (SILVA; SALVADOR, 2005).

2.7.1 Características do Sistema

O Controle Supervisório e Aquisição de Dados ou do inglês *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA) é um sistema de supervisão à distância de processos

industriais entre outros que realiza funções de operação e controle. Possui o objetivo de coletar os dados de vários sistemas, avaliar as condições dos dados recebidos e visualizar os resultados. Além disso, um sistema supervisório disponibiliza funcionalidades de controle para os dispositivos conectados ao sistema e o armazenamento de dados (PAIOLA, 2011).

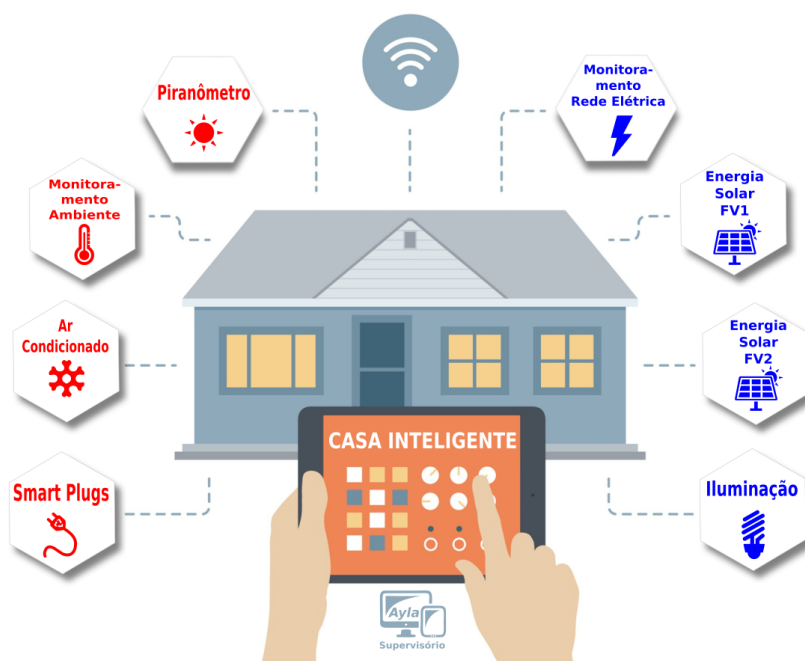
Geralmente são utilizados em sistemas de distribuição de energia elétrica, água e gás, sistemas de coleta de esgoto, oleodutos e gasodutos, sistemas de transporte ferroviário e sistemas industriais. Essa demanda, aliada à evolução tecnológica dos computadores e à acirrada concorrência entre os fabricantes, fez com que a tecnologia SCADA passasse continuamente por melhorias e modificações em sua estrutura (PAIOLA, 2011). Existem vários sistemas supervisórios disponíveis para uso no mercado. A seguir, são listados alguns sistemas supervisórios comerciais:

- Elipse: plataforma para aplicações avançadas e distribuídas, ideal para sistemas de missão crítica e centros de controle. É uma ferramenta consagrada para monitoramento e controle de processos, oferecendo escalabilidade e constante evolução para diversos tipos de aplicações.
- iFIX: é um sistema de automação industrial para muitas aplicações, que vão desde um supervisório comum até um SCADA complexo.
- FactoryTalk View: fornece funcionalidade robusta e confiável num único pacote de software que escala desde um sistema supervisório autônomo até uma solução de visualização distribuída.
- IoTView: com o surgimento da IoT, a demanda por novas funcionalidades embutidas nos dispositivos incluem: A interoperabilidade, a habilidade de troca de dados com sistemas nas nuvens e configuração amigável e intuitiva.
- InduSoft Web Studio: é uma poderosa coleção de ferramentas de automação que possibilita o desenvolvimento de aplicações de supervisão, SCADA, sistemas embarcados e sistemas de instrumentação.
- ProcessView: possui pacote de aplicativos para SCADA e supervisório com conexão Web totalmente escalável. Foi desenvolvido para sistemas operacionais da família Microsoft Windows e pode ser configurado para a utilização, desempenho e redução de custos devido ao seu *design* aberto.
- SIMATIC Wincc: oferece um sistema inovador e escalável de visualização de processos com inúmeras funções de alto desempenho para monitorar processos automatizados.
- ScadaBR: é um software livre, gratuito e de código-fonte aberto, para desenvolvimento de aplicações de automação, aquisição de dados e controle supervisório.

- Wondeware inTouch: usado em mais de um terço das instalações industriais do mundo, o software *InTouch* supervisório proporciona agilidade operacional e desempenho em tempo real.

Porém, neste trabalho, alguns fatores motivaram o desenvolvimento de um sistema SCADA dedicado para o ambiente da CI que foi montada em laboratório. Dentre estes fatores podem ser citados o suporte do sistema supervisório em locais remotos e sem conexão com a *Internet*, sem a necessidade da compra de licenças de software, uma interface gráfica dedicada para o consumidor residencial e a flexibilidade para integrar módulos como, por exemplo, para o uso de redes neurais artificiais. Na Figura 11 é mostrada a estrutura do sistema de gerenciamento de energia proposto nesse trabalho.

Figura 11 – Sistema de gerenciamento de energia



Fonte: Adaptada de [Mesirow \(2017\)](#)

2.8 MODELAGEM UML

Para ilustrar as funcionalidades do sistema supervisório desenvolvido neste trabalho, optou-se por representar de forma visual todos os requisitos levantados. Dessa forma, decidiu-se por utilizar um padrão de modelagem de software na fase inicial do trabalho.

A *Unified Modeling Language* (UML) é ideal para o desenvolvimento de *softwares* que utilizem orientação a objetos. Segundo [Guedes \(2011\)](#), a UML é uma linguagem de modelagem de software que pode ser aplicada a todos os domínios de aplicação. Nos últimos anos, essa linguagem tornou-se a linguagem-padrão de modelagem de software sendo adotada internacionalmente pela indústria de engenharia de *software*.

A UML tem por objetivo auxiliar os engenheiros de *software* na definição das características do sistema, tais como seus requisitos, o seu comportamento, a sua estrutura lógica, a dinâmica de seus processos e até mesmo suas necessidades físicas em relação ao equipamento sobre o qual o sistema deverá ser implantado (GUEDES, 2011). Dentre os vários diagramas da UML, neste trabalho são utilizados o Diagrama de Casos de Uso e o Diagrama de Componentes.

O Diagrama de Casos de Uso tem por objetivo apresentar uma visão geral das funcionalidades que o sistema deverá oferecer ao usuário. Ele é essencial no auxílio da identificação e compreensão dos requisitos do sistema.

O Diagrama de Componentes possibilita a identificação dos componentes que fazem parte do sistema, tais como um subsistema ou seus componentes individuais. Ele é bastante utilizado durante o período de desenvolvimento do sistema.

2.9 Comentários finais

Neste capítulo foram apresentados conceitos básicos pertinentes ao desenvolvimento deste trabalho tais como, as REI e as perspectivas para adoção destas redes, uma comparação com a rede elétrica tradicional e os componentes básicos necessários para criar uma CI. Além disso, foram apresentados conceitos sobre arquiteturas de comunicação, Internet das coisas, redes de Petri, energia solar fotovoltaica, sistemas supervisórios e modelagem UML. No próximo capítulo é apresentada uma revisão da literatura dos temas relacionados com o desenvolvimento deste trabalho.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito de Sistemas de Gerenciamento de Energia (SGE), IoT, *microgrids*, modelagem em Redes de Petri (RP) no estudo de Casas Inteligentes (CI) e redes de comunicação. Esta revisão está organizada seguindo a sequência acima e em cronologia decrescente.

No desenvolvimento de um SGE para uma CI, diversos fatores devem ser considerados. Dentre esses fatores estão os sistemas de supervisão e aquisição de dados que integram o *software* e os subsistemas compostos por plataformas físicas como microcontroladores, sensores e atuadores que formam o *hardware*. Além disso, o meio de comunicação deve ser definido para a interação entre estes dispositivos e o SGE. Os algoritmos utilizados no controle do SGE podem apresentar comportamentos (concorrentes e/ou sequenciais) que justificam a sua modelagem utilizando RP com o objetivo de validar as diversas condições de operação do SGE.

Em [Ki et al. \(2016\)](#), a supervisão do SGE é realizada utilizando um *smartphone*, o sistema de aquisição de dados baseia-se em PHP, Apache e MySQL e a infraestrutura de comunicação é baseada em IoT. Os algoritmos utilizados levam em conta as condições ambientais e conforto de uma CI por meio do uso de sensores de umidade, temperatura, iluminação, presença de pessoas e horário de carregamento das baterias conectadas à rede elétrica. Um desses algoritmos é utilizado, de forma adaptada, no SGE proposto neste trabalho e é apresentado no Capítulo 4.

Na mesma linha de pesquisa, em [Kaiwen et al. \(2016\)](#), é criado um *Website* para ajudar o usuário a acessar o SGE. Além disso, um *Web Server* baseado em Apache e PHP foi desenvolvido para auxiliar a interface *web* a atuar no controle da intensidade da luz e na velocidade de ventiladores, com ajustes baseados no nível de conforto ou de acordo com as necessidades do ocupante. Um controlador é utilizado para processar os dados a serem aplicados nos dispositivos domésticos, bem como para ler as informações de sensores. O microcontrolador Arduino é escolhido como a melhor opção para esta finalidade. O protocolo de comunicação utilizado para enviar os dados para o servidor foi o ZigBee.

[Kumar e Pati \(2016\)](#) realizam o monitoramento e controle *ON/OFF* dos aparelhos numa CI utilizando diversos tipos de serviços, como a *Internet*, o interruptor elétrico e a interface gráfica do usuário (GUI). O sistema possui um *design* de baixo custo, utilizando Arduino e Raspberry como microcontroladores, uma interface fácil de usar e uma instalação simples em edifícios residenciais ou equivalentes. Nesta abordagem, o consumidor pode reduzir o desperdício de energia elétrica por meio do monitoramento de eletrodomésticos ou do planejamento *ON/OFF* adequado dos dispositivos.

Na proposta apresentada por [Suryadevara et al. \(2015\)](#) é utilizada uma rede de sensores sem fio baseada no protocolo de comunicação ZigBee padrão IEEE 802.15.4 para ser aplicada num SGE de uma residência. A interação entre o usuário e as soluções de monitoramento e controle dos eletrodomésticos tem como objetivos o aumento do conforto e uma melhor assistência. A principal funcionalidade deste sistema baseia-se na medição de potência dos eletrodomésticos para realizar o controle dos estados de operação dos mesmos.

Nos trabalhos realizados por [Elma e Selamogullari \(2015a\)](#) e [Elma e Selamogullari \(2015b\)](#), é apresentado um algoritmo para reduzir o consumo de energia elétrica em horários de pico e aumentar a eficiência energética de CI. O algoritmo inclui uma metodologia de controle de tensão dos eletrodomésticos mantendo seu valor abaixo do estabelecido. O objetivo principal é tentar eliminar o desligamento de eletrodomésticos, diminuindo a demanda de energia elétrica e maximizando o conforto do usuário. Foi realizado um estudo com o algoritmo proposto em horários entre 17h e 22h, monitorando 4 eletrodomésticos, sendo um aquecedor de água, um ar condicionado, um secador de roupa e um veículo elétrico. A sua avaliação foi realizada num laboratório universitário com 35 m^2 e equipado com eletrodomésticos que simulam uma residência na Turquia. Cada eletrodoméstico é monitorado e controlado por um computador central utilizando *Smart Plugs* comerciais com padrão de comunicação ZigBee. Dados como a temperatura dos painéis FV, a temperatura do ambiente externo, a tensão e a corrente elétricas são exemplos de informações processadas por este computador. O software desenvolvido é utilizado para monitorar e coletar dados de consumo de energia de cada eletrodoméstico utilizando comunicação *wireless*. A energia solar FV e um banco de baterias também são integrados ao ambiente da CI.

Em [Vega, Santamaria e Rivas \(2015\)](#), cerca de setenta modelos de SGE são relacionados destacando as contribuições de cada trabalho. No estudo, os elementos principais dos modelos de SGE são agrupados de acordo com as estratégias utilizadas para contribuir com a eficiência energética em residências.

[Saha et al. \(2014\)](#) apresentam um algoritmo aplicado ao SGE de uma CI com integração de energia renovável. As principais características desse algoritmo são: O uso da energia solar FV armazenada em bancos de baterias com o objetivo de reduzir o consumo de energia, a determinação dos níveis de conforto e da prioridade no uso das cargas e um programa de resposta em demanda. Neste projeto, para manter o consumo de energia abaixo de um limite estabelecido pelo programa de resposta em demanda é necessário o uso de *Smart Plugs* que utilizam o protocolo de comunicação ZigBee com um servidor do SGE. Esta abordagem também é utilizada, de forma adaptada, no SGE proposto neste trabalho. Os detalhes desta adaptação são apresentados no Capítulo 4.

O SGE proposto por [Han et al. \(2014\)](#) leva em consideração a energia consumida pelos eletrodomésticos e a energia solar FV gerada. O projeto é composto por vários

módulos baseados em ZigBee para monitorar o consumo de eletricidade nos aparelhos domésticos. A geração de energia solar FV é monitorada por meio de Controladores Lógicos Programáveis (CLP), tendo como resultado esperado a otimização do uso da energia elétrica e economia.

Em Wu et al. (2014), é proposto um SGE modular baseado em microcontroladores para monitorar e controlar a demanda de eletricidade de aparelhos de ar condicionado. Com a capacidade de armazenar os dados de consumo de energia, controlando os módulos por meio da *Internet* e aplicando regras de controle de demanda disponíveis num sistema tarifário de resposta em demanda, o SGE proposto tem o propósito de regular o uso de aparelhos de ar condicionado para diminuir a demanda de energia elétrica em horários de pico.

Uma CI pode ter uma estrutura bem definida com acesso suficiente de ativos como, comunicação, controle, dados e tecnologia da informação para o aprimoramento do conforto de ocupantes, proporcionando qualidade de vida, conveniência, redução de custos e aumento de conectividade. Geralmente, utilizam-se tecnologias que ajudam a fazer o controle dos eletrodomésticos durante eventos de picos de demanda. Existe um programa chamado “*ComEd*” nos Estados Unidos que fornece dados em tempo real para os consumidores com vários preços estruturados de tarifas e redução de solicitações de serviços dos clientes. Muitas companhias recentemente tem incorporado interfaces de uso “*Web-Browser*”, por isso, o proprietário também poderá ajustar o termostato ou desligar as lâmpadas da CI utilizando um *smartphone* (ZIPPERER et al., 2013).

Um *datalogger* para monitorar, adquirir dados, analisar e avaliar a operação de um sistema FV é proposto por Swart, Schoeman e Pienaar (2013). Este sistema de monitoramento rentável é aplicado em residências isoladas que utilizam sistemas FV.

Em Kim et al. (2012) é apresentado um sistema para gerenciar os eletrodomésticos com o *Universal Plug-and-Play* (UPnP). As redes sem fio IEEE 802.11 fornecem uma interface de serviço para os clientes fornecendo os preços de energia elétrica e informações de uso. Além do SGE, os autores também implementam uma aplicação móvel para que os clientes, fora da casa, possam acessar o SGE e seus serviços. O objetivo do UPnP é conectar eletrodomésticos por meio de uma arquitetura uniforme e assegurar conexões de rede para fazer a transferência de dados de forma confiável entre os dispositivos.

Na definição da infraestrutura de comunicação do SGE desenvolvido neste trabalho foi necessário adotar um conceito que tornasse possível a interligação dos dispositivos físicos às plataformas lógicas ou virtuais. Seguindo este conceito, um modelo conceitual para as REI dentro do contexto de IoT é proposto por Al-Ali e Aburukba (2015).

As REI podem ser baseadas em redes de comunicação sem fio e com fio. Independentemente da tecnologia esta classificação pode ser mostrada na literatura como *Home*

Area Network (HAN), *Neighborhood Area Network* (NAN), *Access Network*, *Backhaul Network*, *core* e *External networks*. Estas redes conectam vários objetos inteligentes, tais como, eletrodomésticos, medidores inteligentes, chaves, religadores, banco de capacitores, dispositivos eletrônicos integrados (IEDs), transformadores, relés, atuadores, pontos de acesso, *switches*, roteadores, computadores, impressoras, escaners, câmeras, *field testing devices* e outros dispositivos. Todos estes objetos são geograficamente distribuídos por toda a REI a partir das unidades residenciais (CI) até as subestações e, finalmente, até o centro de operação da concessionária de energia (AL-ALI; ABURUKBA, 2015).

As CI são equipadas com eletrodomésticos inteligentes que são considerados como uma coisa ou objeto. Esses objetos podem ser aparelho de ar condicionado, aquecedor de água, lavadora de louça, refrigerador, medidores inteligentes de energia/gás/água, *in-home displays*, iluminação automatizada, célula solar FV, veículo elétrico recarregável e armazenamento de energia em baterias. Um único IP é atribuído a cada dispositivo. Desta forma, cada dispositivo pode ser acessado via *Internet* por uma autorização pessoal. Assim, os operadores das concessionárias e os consumidores também podem acessar a página *web* de dados (AL-ALI; ABURUKBA, 2015).

No trabalho apresentado por Choi, Lee e Lee (2012) é desenvolvido um SGE para um prédio visando eficiência e economia de energia. Essa implementação consiste de um servidor para cada apartamento, um servidor de resolução de atividades do conjunto de apartamentos, eletrodomésticos e fontes renováveis de energia, nesse caso, BIPV (Painéis Solares Integrados à Construção). Cada servidor de apartamento gerencia a energia utilizada pelos eletrodomésticos por meio de controle *on/off* baseado em escalonamento definido pelo usuário e resposta em demanda. Com base nas informações climáticas, custo da energia e uso da energia em cada apartamento, o servidor do conjunto de apartamentos controla as instalações de energia e eletrodomésticos para reduzir o consumo de energia.

Em Han, Choi e Lee (2011) é desenvolvido um SGE que utiliza comunicação ZigBee e controles remotos infravermelhos (IR) para reduzir o consumo de energia numa CI. Os componentes do sistema são a rede ZigBee configurada num servidor da CI, o roteador ZigBee, as tomadas e as lâmpadas. Este servidor pode gerenciar as tomadas instaladas na rede elétrica da CI e as lâmpadas por meio de um roteador ZigBee com função de aprendizagem de código IR, permitindo que um usuário possa controlar as tomadas da rede elétrica e as lâmpadas por meio do uso de um controle remoto IR. Uma interface do SGE oferece vários tipos de painéis de controle para que um usuário possa verificar as informações detalhadas sobre o uso de energia.

Já em Ahmed et al. (2015) é apresentada uma introdução sobre o conceito de *microgrids* ou microrredes, enfatizando os tipos de recursos renováveis que podem ser utilizados, assim como os modos de operação isolado e conectado à rede da concessionária. No modo isolado os recursos renováveis suprem a necessidade energética sem a necessidade

da interligação deste sistema com a rede da concessionária. Num *microgrid* os recursos de geração podem incluir solar FV, eólica, célula combustível, microturbinas, etc. Segundo os autores, alguns parâmetros devem ser levados em conta para ser um *microgrid*: Microgrids de pequena escala podem cobrir um raio de 30 a 50 km, podem produzir de 5 a 10 MW de potência para os seus consumidores. Eles são livres das grandes perdas e das longas distâncias relacionadas com as linhas de transmissão da concessionária de energia.

No contexto da modelagem em RP dos algoritmos utilizados no SGE desenvolvido nesse trabalho os seguintes trabalhos merecem destaque.

Em [Ghasemieh, Haverkort e Remke \(2015\)](#) é apresentado um modelo em RP Híbridas de uma CI que utiliza, principalmente, energia solar FV. É analisado o impacto de diferentes estratégias no uso do banco de baterias com ênfase em: a) Como a energia gerada localmente é usada? e b) Como a CI se torna resiliente quando submetida à interrupções de energia. Três estratégias para o SGE são utilizadas no trabalho. A primeira estratégia é denominada *Greedy* e consiste na descarga total do banco de baterias e o seu carregamento é feito apenas pela energia local gerada. Na segunda estratégia, denominada *Smart*, quando a energia da concessionária está presente, o banco de baterias nunca é descarregado totalmente. Ele é descarregado somente até um SoC predefinido. Assim, parte de sua energia é mantida como reserva para o caso de ocorrência de falta de energia elétrica. O carregamento do banco de baterias também é feito apenas pela energia local gerada. A terceira estratégia, denominada *Conservative*, nesta assim como na estratégia *Smart*, o banco de baterias é descarregado somente até um certo SoC quando a energia da concessionária está disponível. Contudo, quando esse estado é alcançado, a rede elétrica é utilizada para, parcialmente, recarregar o banco até um novo valor de SoC. Por fim, é realizada uma comparação entre as três estratégias por meio de simulações e análise da RP Híbrida, utilizando dados adquiridos durante as estações de inverno e verão.

[Nabih et al. \(2011\)](#) propõem uma técnica utilizando as RP para modelagem, simulação, análise e controle a nível de eventos discretos das aplicação de uma CI. Aplicações de CI complexas incluem três níveis de controle: controle local, controle a eventos discretos e controle supervisão. O controle local, no nível mais baixo, lida com as condições de operação das variáveis físicas de tempo contínuo (por exemplo, temperatura, luz, nível, etc.). O controle a eventos discretos é caracterizado pela ocorrência de eventos assíncronos baseados em ações discretas e especificações de evolução. O controle supervisão, no nível superior, é responsável pela alocação de recursos, coordenação de atividades e prevenção de bloqueios. As contribuições do trabalho segundo os autores são: modelar formalmente as especificações complexas no domínio de uma CI e propor um algoritmo que pode ser modelado, simulado e verificado para, em seguida, ser aplicado no gerenciamento de uma CI. Os sistemas considerados no trabalho são: sistema de alarmes contra incêndio, sistema de controle climático e sistema de acesso remoto.

Enfim, com relação a escolha do protocolo a ser utilizado na rede de comunicação deste trabalho levou-se em conta o seguinte.

Segundo [Sethuraman e Jayanthi \(2014\)](#), o conceito de SGE tem sido um tópico interessante para pesquisadores e utilizadores durante os últimos anos. A maioria das técnicas recentes se concentram na exploração da tecnologia *wireless* como forma para realizar comunicação com outros dispositivos, tais como celulares e *laptops*. A maioria das arquiteturas de SGE são baseadas em energias renováveis e CLP. A medição de energia é feita por medidores inteligentes e, às vezes, são preferidos medidores digitais. Essa implementação de CI com um SGE baseado CLP apresenta um custo elevado em relação à utilização de microcontroladores como 8051, ATmega, PIC e ARM. Portanto, os autores apresentam o desenvolvimento de um SGE baseado no controlador PIC 16f877A. O consumo de energia dos aparelhos e a geração de energias renováveis da CI são coletados por um servidor, o qual é utilizado para analisar e controlar o consumo de energia com o objetivo de reduzir o custo de energia.

No trabalho realizado por [Ahmed, Kang e Kim \(2015\)](#) é descrito o projeto de uma arquitetura de comunicação que utiliza tecnologias com fio e sem fio para monitorar e controlar sistemas distribuídos de energia envolvendo turbinas eólicas de pequeno porte e sistemas FV. O sistema de comunicação é composto de três camadas: *device layer*, *network layer*, and *application layer*. Dois cenários são considerados: uma CI e um prédio inteligente. Vários tipos de nós sensores e dispositivos de medição são definidos para monitorar as condições dos sistemas de energia renovável. A ferramenta *OPNET Modeler* é utilizada na avaliação de desempenho da rede de comunicação em termos de *end-to-end (ETE) delay*¹. O desempenho da rede é comparado com base em *ETE delay*, confiabilidade e custo de implementação para três diferentes tecnologias: Ethernet, WiFi e ZigBee.

3.1 Comentários finais

Neste capítulo foi apresentada uma revisão da literatura dos temas relacionados com o desenvolvimento deste trabalho. Esses temas são: SGE e operação entre dispositivos, a viabilidade da aplicação da tecnologia IoT, *microgrids*, modelagem em RP aplicada no estudo dos algoritmos utilizados em CI e os protocolos de comunicação para a transmissão de dados.

No próximo capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

¹ Atraso de ponta a ponta ou atraso unidirecional (OWD) refere-se ao tempo que um pacote demora a ser transmitido através de uma rede, da origem ao destino.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

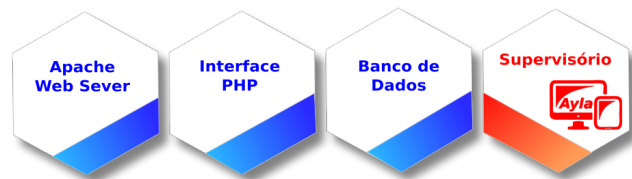
Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do Sistema de Gerenciamento de Energia (SGE) proposto neste trabalho para uma Casa Inteligente (CI).

4.1 O SGE Proposto

O desenvolvimento do SGE está dividido em cinco etapas:

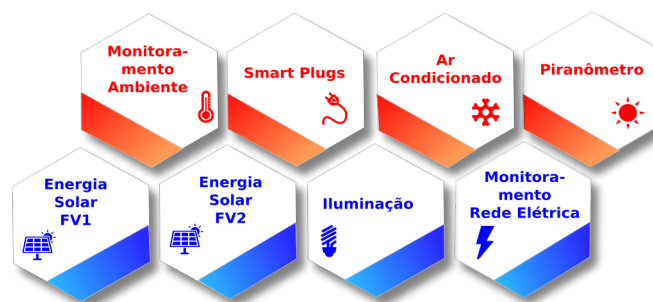
1. Concepção do sistema supervisorio que permita ao consumidor: Visualizar as informações dos sensores, testar a comunicação entre as plataformas físicas por meio da infraestrutura baseada em IoT, configurar os algoritmos para o funcionamento automático da CI ou executar uma ação manual nos atuadores dos sistemas de iluminação e ar condicionado (AC). Na Figura 12 são apresentados os componentes de *software* utilizados no sistema supervisorio. Para aquisição dos dados, um servidor *Web* Apache foi configurado para realizar a interpretação dos métodos do protocolo *http*. A linguagem PHP foi utilizada para processar as informações destinadas ao servidor *Web* e para fornecer suporte de conexão com o banco de dados (MySQL).

Figura 12 – Plataformas lógicas do sistema supervisorio (*Software*)



Fonte: O autor

2. Montagem do *hardware* do SGE utilizando microcontroladores, sensores e atuadores. Assim, foram construídas as plataformas físicas de sensoramento responsáveis pelo monitoramento do ambiente da CI (temperatura, umidade, iluminância e presença de pessoas), monitoramento da rede elétrica (tensão, corrente e potência), monitoramento da irradiância solar utilizando um piranômetro e o monitoramento dos sistemas de geração solar FV. Além disso, as plataformas físicas de atuação responsáveis pelo acionamento de aparelhos e eletrodomésticos utilizando um *smart plugs*, sistema de iluminação e ar condicionado (AC). Na Figura 13 são apresentados os componentes de *hardware* desenvolvidos para integrar o SGE de uma CI.

Figura 13 – Plataformas físicas do SGE (*Hardware*)

Fonte: O autor

3. Modelagem em RP de cada algoritmo utilizado no SGE. Dessa forma, pretende-se verificar a operação de cada algoritmo como *thread* (paralelismo), a presença de *deadlocks* e na definição dos cenários de operação propostos para uma CI.
4. Montagem física do SGE, incluindo a instalação e configuração da plataforma lógica no qual o sistema supervisor chamado Ayla foi desenvolvido. Consequentemente, a integração das plataformas físicas sendo estas conectadas ao sistema supervisor por meio de uma infraestrutura IoT, visando o funcionamento adequado dessa rede. Os testes dos módulos de comunicação foi realizado por meio da montagem de um servidor Zabbix com o objetivo de monitorar e enviar pacotes ICMP (*Internet Control Message Protocol*) na rede de comunicação WiFi para validação.
5. Implementação e testes dos algoritmos de operação do SGE, visando a economia no consumo de energia, a eficiência e o conforto do usuário de uma CI. Os resultados dos testes de validação dos algoritmos são apresentados no Capítulo 5. Esses algoritmos apresentam as seguintes características:

Algoritmo I - Leva em consideração as condições do ambiente da CI. Os objetivos são economizar energia e manter os confortos térmico e visual por meio do controle do ar condicionado e da quantidade de lâmpadas ligadas.

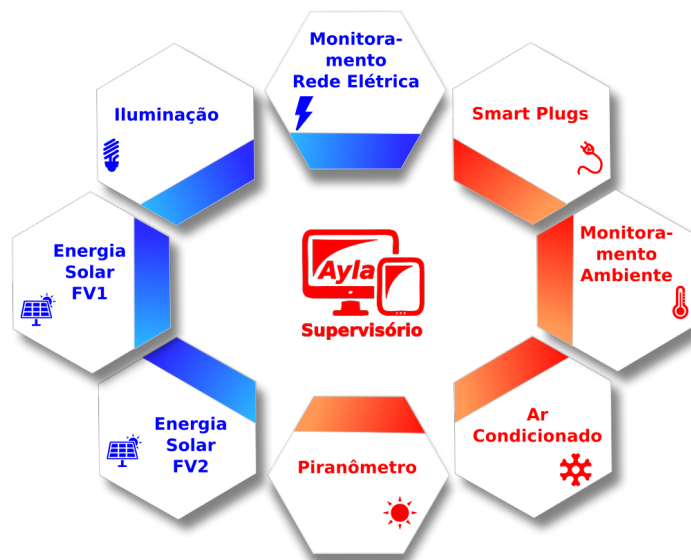
Algoritmo II - Com base em níveis de conforto do ambiente da CI, são definidas prioridades para o uso de cargas, limitação da potência de consumo e gerenciamento integrado da energia renovável.

Algoritmo III - Proposto neste trabalho com base na combinação das abordagens utilizadas nos Algoritmos 1 e 2.

Na Figura 14 é mostrada a estrutura do SGE. Todos os subsistemas integrados, ou seja, plataformas físicas e plataformas lógicas funcionando de forma centralizada utilizando uma rede de comunicação sem fio. O sistema supervisor (Ayla) como um IHD, sendo utilizado para aquistar os dados de monitoramento, tomar decisões a partir da ação

manual do consumidor para ligar/desligar uma lâmpada ou configurar os parâmetros de operação dos algoritmos utilizados.

Figura 14 – Estrutura do SGE proposto



Fonte: O autor

Na Figura 15 é mostrado o diagrama do processo de interação entre as plataformas físicas, lógicas e rede de comunicação sem fio do SGE.

4.2 Sensores e Atuadores

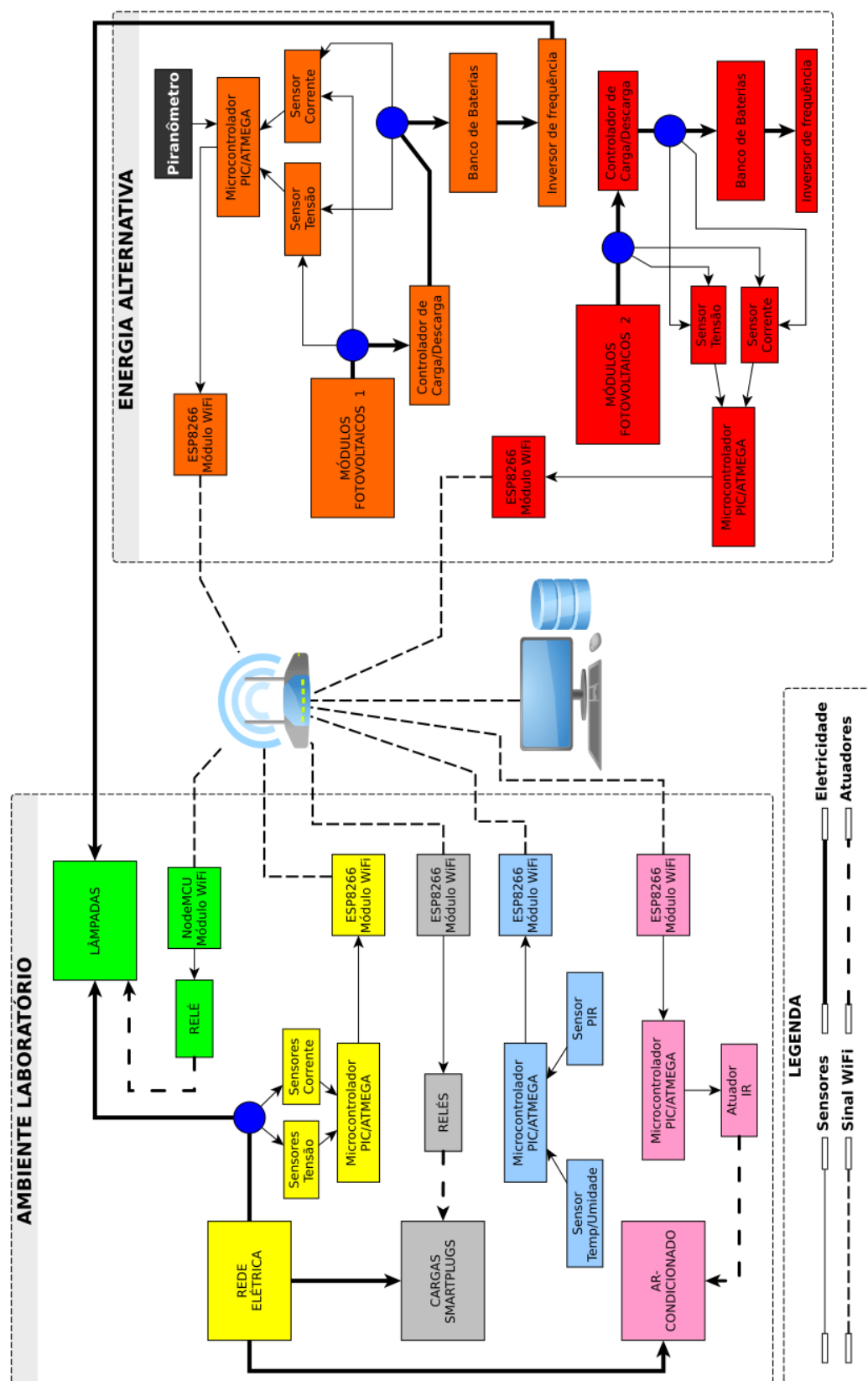
Os sensores são peças fundamentais no monitoramento e supervisão de processos. As grandezas medidas pelos sensores são combinadas para obter informações sobre o meio físico onde estão presentes. Os atuadores são dispositivos que produzem movimento, atendendo a comandos que podem ser manuais, elétricos ou mecânicos. Os microcontroladores, sensores, atuadores e interfaces de comunicação utilizados neste trabalho são descritos a seguir:

- ARDUINO

Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre e de placa única, projetada com um microcontrolador Atmel AVR com suporte de entrada/saída embutido e uma linguagem de programação padrão baseada em C/C++ (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013). Nesse trabalho são utilizados dois modelos de Arduino:

- Arduino UNO - Microcontrolador: ATmega328; Clock: 16 MHz; Tensão de operação: 5 V; Tensão de entrada: 7-12 V; Portas digitais: 14 (6 podem ser usadas como PWM (*Pulse Width Modulation*)); Portas analógicas: 6; Memória flash: 32 kB; SRAM (*Static Random Access Memory*): 2 kB; EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*): 1 kB.

Figura 15 – Diagrama do processo de interação entre as plataformas do SGE



Fonte: O autor

- Arduino MEGA - Microcontrolador ATmega2560; Clock: 16 MHz; Tensão de operação: 5 V; Tensão de entrada: 7-12 V; Portas digitais: 54 (15 podem ser usadas como PWM); Portas analógicas: 16; Memória flash: 256 kB; SRAM: 8 kB; EEPROM: 4 kB.

- NodeMCU + ESP8266

O módulo WiFi NodeMCU ESP8266 é uma placa de desenvolvimento que combina o chip ESP8266, uma interface USB (*Universal Serial Bus*) e um regulador de tensão 3,3 V. Possui conectores GPIO (*General Purpose Input/Output*), barramentos I2C (*Inter-integrated Circuit*), SPI (*Serial Peripheral Interface*), UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*), saída PWM e sensor interno de temperatura. Com o protocolo TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) integrado ao módulo WiFi ESP8266 é possível a implantação do acesso a rede WiFi com qualquer microcontrolador, inclusive da linha Arduino.

- Sensor PIR DYP-ME003

O Sensor de movimento PIR DYP-ME003 é utilizado para detectar a presença de pessoas ou objetos em ambientes monitorados.

- Sensor DHT11

Este sensor permite medir temperaturas de 0 a 50 °C e umidades na faixa de 20 a 90 %. É recomendável que não seja utilizado em ambientes de alto risco.

- Sensor de corrente ACS712

Sensor eletrônico de corrente baseado em efeito Hall para medição de corrente CC e CA. Faixa de medição entre -30 e +30 A.

- Sensor de tensão CA

Sensor eletrônico para medição de tensões CA. Utiliza um optoacoplador para garantir isolamento. Valores de tensão 127/220 V.

- Sensor de corrente CA SCT013

Sensor de corrente não invasivo para medição em CA.

- Sensor LDR GL5528

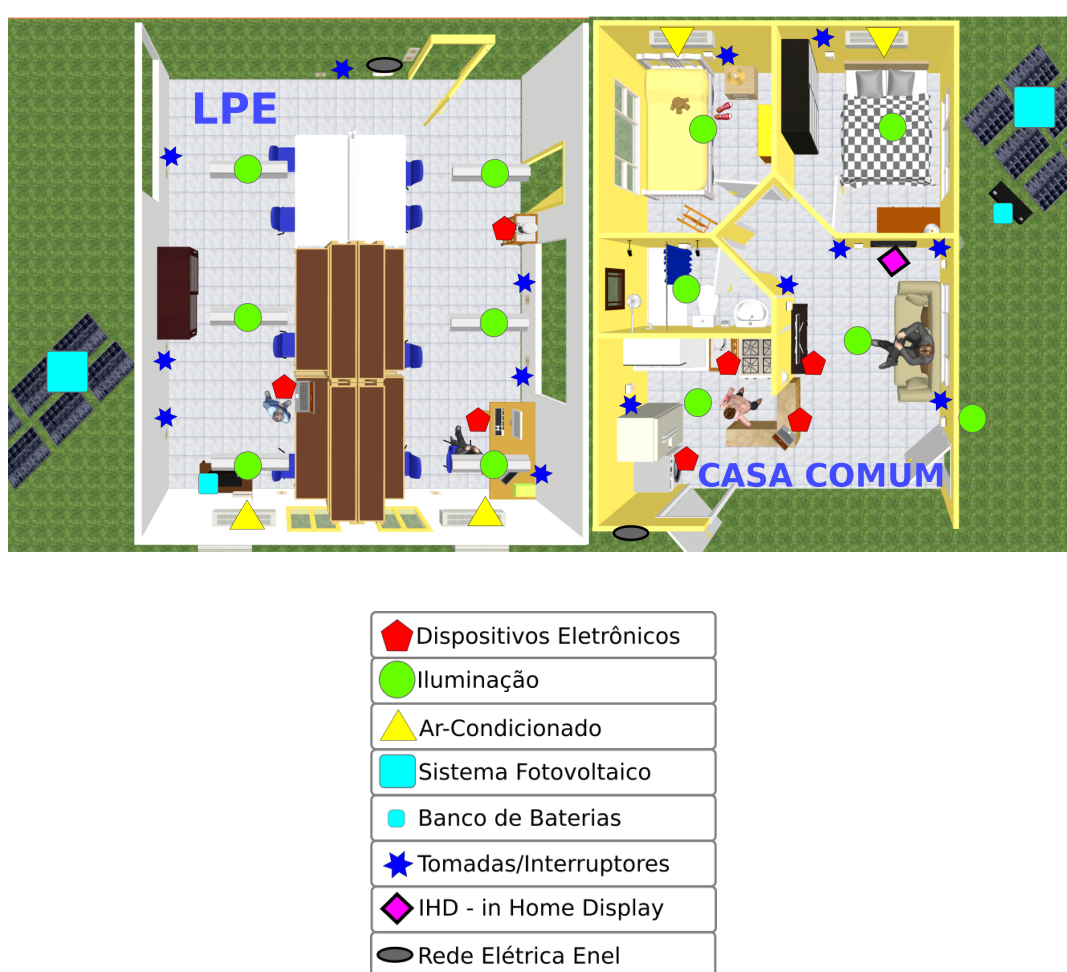
O sensor LDR (*Light Dependent Resistor*) é um dispositivo cuja resistência varia de acordo com a intensidade da luz. Quanto mais luz incidir sobre o componente, menor será a sua resistência.

4.3 Proposta de Ambiente (CI)

A implementação prática desse trabalho foi realizada no Laboratório de Processamento de Energia (LPE) do Departamento de Indústria do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza.

Na Figura 16, à esquerda, é mostrado o LPE e, à direita, é mostrado onde estes recursos são utilizados em uma CI exemplo. Cada tipo de recurso da CI é representado por uma forma geométrica diferente conforme a legenda na parte inferior da figura. Também são apresentados os componentes do LPE que podem ser monitorados com o SGE proposto.

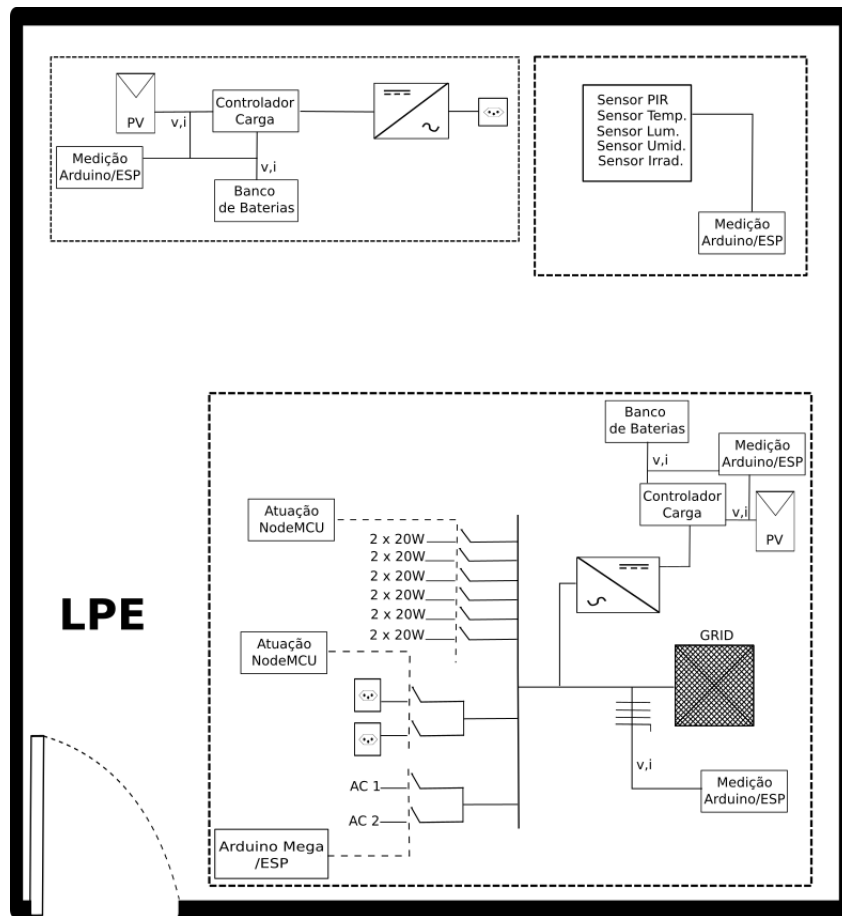
Figura 16 – Ambiente da aplicação do projeto



Fonte: O autor

Para demonstrar a ligação dos sensores e atuadores no LPE, um esquema elétrico foi criado, mostrando as variáveis de monitoramento do ambiente e as ligações de cada plataforma física (*hardware*). Este esquema é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Esquema elétrico dos sensores e atuadores no LPE



Fonte: O autor

4.4 Calibração dos Sensores de Tensão e Corrente CA

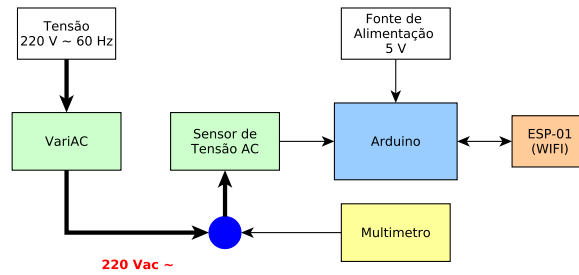
Os sensores de tensão e corrente utilizados no SGE foram submetidos a um processo de calibração. Para tanto, foram realizados vários ensaios nos quais as leituras desses sensores foram comparadas com as leituras de aparelhos comerciais. A seguir, são apresentados os procedimentos e resultados desses ensaios. No Apêndice A são apresentadas as montagens utilizadas na calibração dos sensores.

- **Sensor de Tensão CA**

Para avaliar as medições de tensão do sensor, um variador de tensão CA trifásico (Variac) foi conectado à entrada do sensor para fornecer diferentes valores de tensão CA. Simultaneamente, foi realizada a medição de cada valor de tensão utilizando um multímetro digital da Minipa, modelo ET-2042D. A intenção era verificar se a tensão de saída do variador estava de acordo com a entrada no sensor. Na Figura 18 é mostrado o diagrama de conexão dos componentes utilizados na calibração dos sensores de tensão CA.

Os dados aquisitados foram divididos conforme mostrado na Tabela 4. Sendo

Figura 18 – Calibração do sensor de tensão CA



Fonte: O autor

dividido em três partes, a primeira parte da tabela são as entradas dos valores de tensão fornecidos pelo Variac, seguidos pelos dados em Bytes (B) do sensor e, finalmente, as saídas em Volts (V) dos valores tratados por meio de regressão linear polinomial.

Tabela 4 – Calibração dos sensores de tensão CA

Variac	Sensor1 (B)	Sensor2 (B)	Sensor3 (B)	Saída (V)	Saída (V)	Saída (V)
Tensão (V)	U1	U2	U3	Tensão U1	Tensão U2	Tensão U3
200	45	125	132	200,1168	200,7400	200,0307
204	47	129	138	203,9940	203,9942	204,2166
208	49	133	143	207,7727	207,1887	207,7207
212	51	138	149	211,4527	211,0980	211,9447
216	54	145	154	216,7877	216,4144	215,4806
220	56	150	161	220,2211	220,1000	220,4550
224	58	157	165	223,5559	225,1033	223,3104
228	61	161	173	228,3731	227,8803	229,0486
232	63	167	177	231,4612	231,9339	231,9316
236	66	172	182	235,9085	235,2094	235,5483
240	69	180	188	240,1339	240,2564	239,9074

Fonte: O autor

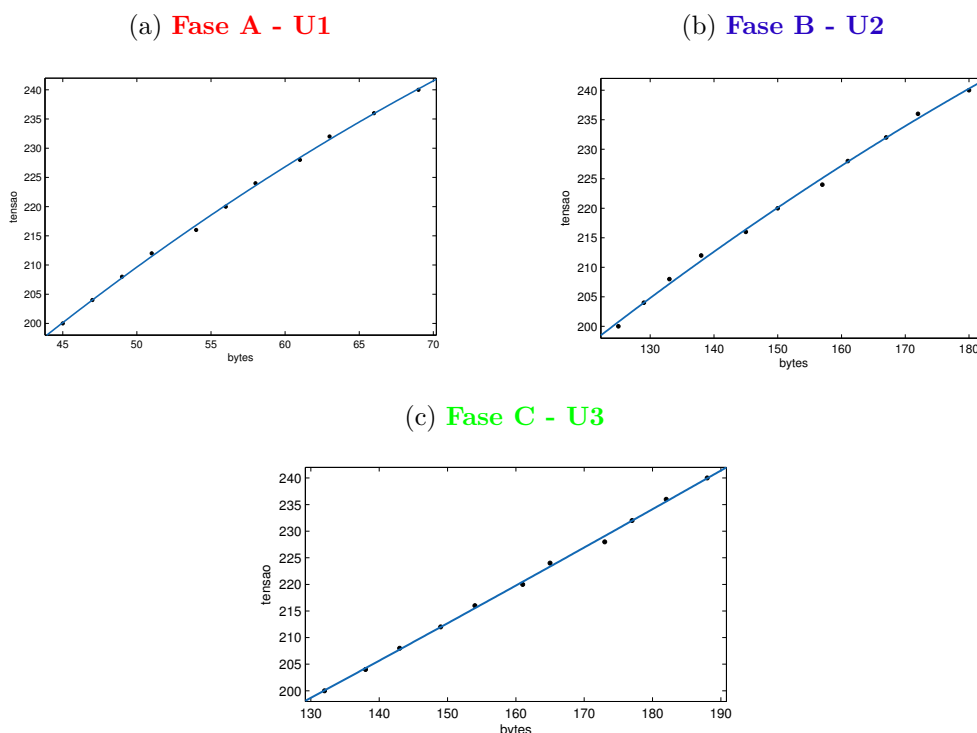
A Equação 4.1 foi utilizada para modelar os dados obtidos pelos sensores de tensão para cada valor de tensão fornecido pelo Variac. Portanto, para cada sensor empregado foi necessário encontrar os coeficientes p_n . Como o sistema de energia elétrica do LPE é trifásico, foi utilizado um sensor de tensão CA para cada fase.

$$f(x) = p_1x^2 + p_2x + p_3 \quad (4.1)$$

- Sensor da **Fase A - U1**: Os coeficientes obtidos são: $p_1 = -0,01233$, $p_2 = 3,073$, $p_3 = 86,8$.
- Sensor da **Fase B - U2**: Os coeficientes obtidos são: $p_1 = -0,001864$, $p_2 = 1,287$, $p_3 = 68,9$.
- Sensor da **Fase C - U3**: Os coeficientes obtidos são: $p_1 = 0,000288$, $p_2 = 0,619$, $p_3 = 113,2$.

Na Figura 37 são mostrados os gráficos dos ajustes de regressão aplicados aos dados de cada um dos sensores de tensão CA.

Figura 19 – Ajustes de regressão aplicados aos sensores de tensão CA

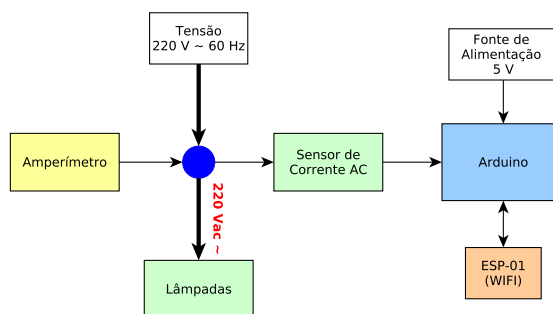


Fonte: O autor

- **Sensor de Corrente CA**

Para as medições de calibração do sensor de corrente CA modelo SCT-013 e não invasivo, foi necessário utilizar um conjunto de lâmpadas ligadas em diferentes configurações. O equipamento utilizado para validar a leitura da corrente foi o alicate amperímetro, modelo Minipa ET-4080. Na Figura 20 é mostrado o diagrama de conexão dos componentes utilizados na calibração dos sensores de corrente CA. O valor aquisitado no equipamento comercial foi comparado ao valor de leitura dos sensores de corrente CA SCT-013.

Figura 20 – Calibração dos sensores de corrente CA



Fonte: O Autor

Na Tabela 5 são mostrados os valores aquisitados pelos sensores de corrente em comparação aos valores medidos pelo alicate amperímetro comercial. Note que os valores

medidos AMP (ampere) são multiplicados por 5, devido ao número de voltas (5 neste caso) do condutor da corrente a ser medida na garra do alicate amperímetro, com o objetivo de obter valores de medida estáveis e precisos. Nos testes de calibração foram utilizados três sensores de correntes SCT-013, denominados por F1, F2 e F3. Os valores aquisitados pelo alicate amperímetro “ $Aref = AMP/5$ ” são referência para comparação com os valores medidos pelos sensores.

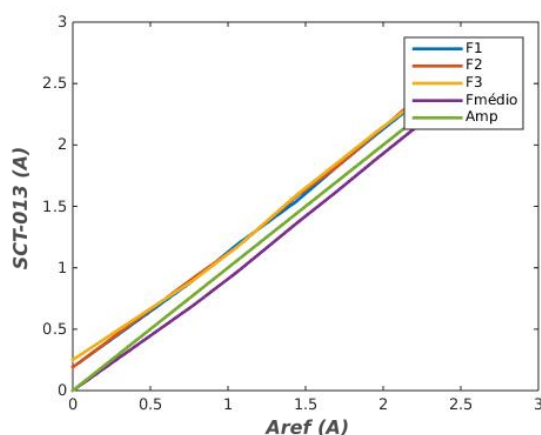
Tabela 5 – Calibração do sensor de corrente CA

F1	F2	F3	AMP*5	Aref
0	0	0	0	0
0,91	0,91	0,91	3,90	0,78
1,19	1,21	1,19	5,30	1,06
1,82	1,87	1,87	8,60	1,72
2,74	2,81	2,81	13,20	2,64
2,46	2,50	2,50	11,80	2,36
1,83	1,84	1,83	8,50	1,70
1,56	1,58	1,60	7,30	1,46
0,90	0,92	0,90	3,90	0,78
1,19	1,17	1,17	5,30	1,06
1,54	1,58	1,59	7,20	1,44
1,82	1,82	1,85	8,50	1,70
2,09	2,10	2,11	9,80	1,96
2,72	2,83	2,80	13,20	2,64
2,49	2,53	2,49	11,80	2,36
0,19	0,19	0,25	0	0

Fonte: O autor

Na Figura 21 são mostrados os gráficos de medição das correntes, a diferença entre a leitura das correntes dos sensores em relação ao alicate amperímetro foi apenas um sobrevalor de 0,21 A. Na prática, quando estão sendo medidos altos valores de corrente esse sobrevalor se torna quase imperceptível. Como no caso de uma casa, por exemplo, em que a medição de correntes abaixo de 1 A é pouco usual. Portanto, os valores de medições dos três sensores foram praticamente iguais e a média de leitura, subtraindo o sobrevalor de 0,21 A resultou na reta roxa do “ $F_{\text{médio}}$ ”. A reta verde “ Amp ” é a referência dos valores de leitura do equipamento comercial.

Figura 21 – Gráfico de leitura das correntes



Fonte: O autor

4.5 Hardware do Sistema

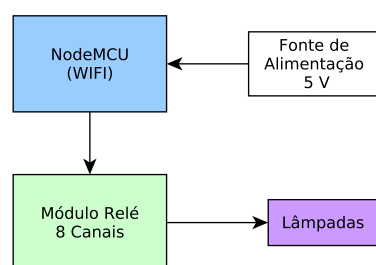
Cada circuito eletrônico utilizado na montagem física dos componentes deste trabalho é considerado um módulo que possui uma função específica. Os módulos sensores e atuadores foram formados pela combinação dos seguintes dispositivos: Arduino, ESP-01, NodeMCU, sensor, atuador e fonte de alimentação.

Como definido anteriormente, os subsistemas que realizam monitoramento por meio sensores são: o monitoramento do ambiente, o monitoramento da rede elétrica, o piranômetro e o monitoramento do subsistema FV. Os subsistemas que são controlados por meio de um dispositivo atuador são: a iluminação, os *Smart plugs* e o Ar Condicionado (AC). Estes constituem toda a parte física do sistema, incluindo o servidor e as interfaces de comunicação como o roteador e os módulos WiFi.

4.5.1 Subsistema I - Iluminação

O subsistema de iluminação foi desenvolvido com os seguintes módulos: NodeMCU, fonte de alimentação e relés eletromagnéticos (atuadores). A utilização destes módulos integrados viabilizam a capacidade do sistema supervisorio (Ayla) na ação de atuar, ou seja, ligando/desligando as lâmpadas. No LPE estão instaladas 12 lâmpadas tubulares de LED, cada uma com potência nominal de 18 W. Na Figura 22 é mostrado o diagrama de blocos do módulo de atuação do subsistema de iluminação.

Figura 22 – Diagrama de blocos do subsistema de Iluminação



Fonte: O autor

O controle do subsistema de iluminação pelo sistema supervisorio leva em consideração os parâmetros presença de pessoas e iluminância necessária. Este subsistema pode ser alimentado de duas formas: pela concessionária de energia ou pelo sistema de geração solar FV. Cabe ao sistema supervisorio a decisão sobre qual fonte deve ser utilizada. Dessa forma, é possível reduzir o consumo de energia elétrica fornecida pela concessionária. A comutação entre as fontes é realizada por meio de um contator eletromagnético. Note que é possível ligar/desligar as lâmpadas tanto pelo supervisorio, quanto pelos interruptores do LPE. No Anexo A é mostrado o esquema elétrico de comutação.

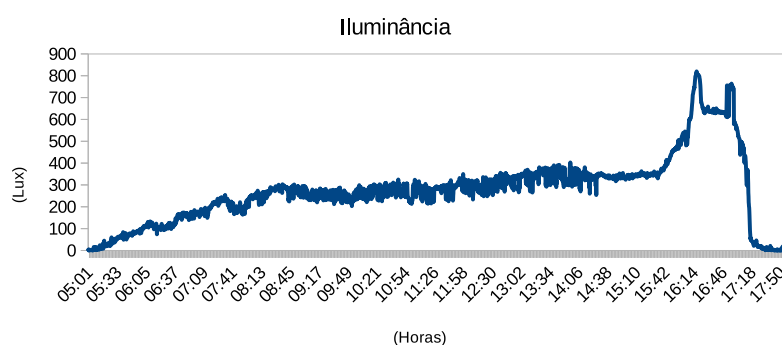
Muitas pesquisas sobre níveis de conforto visual utilizando controle da iluminação têm sido realizadas. Entre os assuntos estão o desenvolvimento de algoritmos, redes neurais e sistemas de controle para definir a iluminação adequada para um local de trabalho ou casa (WANG; DASGUPTA, 2014). No Apêndice B é mostrado o subsistema de iluminação desenvolvido no LPE.

Na norma NBR-5413 (1992) são definidos os requisitos de iluminância artificial de interiores para ambientes em que são realizadas atividades de comércio, indústria, ensino e esporte. As recomendações desta norma são:

- A iluminância deve ser medida no campo de trabalho. Quando este não for definido, entende-se como tal nível referente a um plano horizontal a 0,75 m do piso. Esta recomendação foi utilizada neste trabalho para posicionar os sensores de iluminação;
- No caso de ser necessário elevar a iluminância em limitado campo de trabalho, pode-se usar iluminação suplementar;
- A iluminância no restante do ambiente não deve ser inferior a 1/10 da adotada para o campo de trabalho, mesmo que haja recomendação para valor menor;
- Recomenda-se que a iluminância em qualquer ponto do campo de trabalho não seja inferior a 70 % da iluminância média determinada segundo a NBR 5382¹.

Na Figura 23 é mostrado o gráfico da iluminação natural no LPE até por volta das 15h40, logo após a iluminação artificial foi ligada. O pico de iluminância com iluminação artificial possui um valor de aproximadamente 800 lux.

Figura 23 – Iluminância durante um dia no LPE



Fonte: O autor

O LPE, conforme a NBR-5413, se enquadrar no seguinte tipo de atividade: Tarefas com requisitos visuais normais, trabalho médio de maquinaria, escritórios. Portanto, foram adotados os valores de 500 a 1000 lux para a iluminância. A validação dos dados adquiridos

¹ Verificação da iluminância de interiores - Método de ensaio.

(em lux) pelos sensores de iluminância foi realizada utilizando o luxímetro comercial da Skill Tec, modelo SKLD-50.

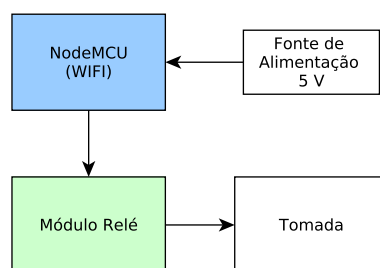
4.5.2 Subsistema II - *Smart Plugs*

As cargas conectadas às tomadas podem ser ligadas/desligadas de acordo com os modos de operação definidos nos algoritmos do sistema supervisor. Os *Smart plugs* já são bastante utilizados para reduzir o consumo de energia, aumentar a eficiência do uso da energia elétrica e manter o conforto do usuário de uma CI. Saha et al. (2014) e Elma e Selamogullari (2015a) demonstram a aplicabilidade desta tecnologia no controle do consumo de energia.

Em Suryadevara et al. (2015) desenvolvem um *Smart Plug* com um sistema inteligente de monitoramento para: Controle dos eletrodomésticos, leitura de parâmetros elétricos e cálculo da energia consumida.

Este tipo de dispositivo é bastante difundido comercialmente. Várias empresas desenvolvem diferentes modelos e com diferentes tipos de recursos no produto. Na Figura 24 é mostrado o diagrama de blocos do módulo de atuação das cargas ou *Smart Plug*. A lista com os módulos da montagem é apresentada a seguir.

Figura 24 – Subsistema de atuação em cargas



Fonte: O autor

1. NodeMCU: Módulo WiFi utilizado na comunicação entre o sistema supervisor e os *Smart Plugs*;
2. Módulo Relé: Dispositivo para ligar/desligar a carga conectada ao *Smart Plug*. É acionado pelo módulo NodeMCU a partir de um comando enviado pelo sistema supervisor;
3. Fonte de alimentação.

O *Smart Plug* desenvolvido no LPE possui comunicação sem fio padrão *IEEE 802.11g/n*. Neste trabalho ele funciona apenas como um dispositivo atuador sobre a carga conectada. No Apêndice C é mostrado o resultado final do projeto do dispositivo.

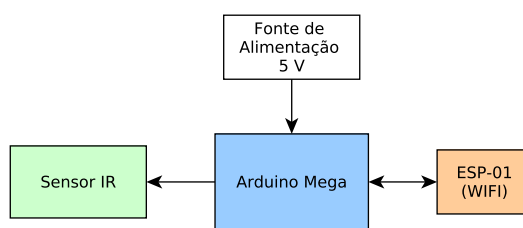
4.5.3 Subsistema III - Ar Condicionado

A necessidade de controlar a temperatura do ambiente e ao mesmo tempo economizar energia elétrica tem sido um desafio. Segundo [Özkan e Aybar \(2016\)](#), os AC são responsáveis por parte significativa do consumo de energia elétrica em domicílios. Sistemas para controlar a temperatura ambiente são denominados *Heating and Air Conditioning System* (HVAC).

O AC se tornou um dos aparelhos indispensáveis numa CI quando o assunto é o conforto do usuário, principalmente em algumas regiões do Brasil onde o clima é bastante elevado com temperaturas acima de 28°C.

Na Figura 25 é mostrado o diagrama de blocos do dispositivo atuador utilizado no controle do AC.

Figura 25 – Subsistema de controle de AC



Fonte: O autor

Os modelos de AC utilizados neste trabalho são produtos comerciais de porte residencial. O controle da temperatura ambiente utilizando estes dispositivos é realizado pelo sistema supervisor. Na Tabela 6 são mostradas as informações técnicas de cada AC utilizado na CI do LPE.

Tabela 6 – Características Técnicas dos AC I e II

Marca	Carrier (AC I)	Midea (AC II)
Tensão de alimentação (V) - 60 Hz	220	220
Eficiência energética EER (W/W)	3,26	3,26
Potência de refrigeração (W)	1528,00	1528,00
Consumo de energia Procel (kWh/mês)	32,10	32,10
Corrente nominal (A)	7,50	7,50

Fonte: O autor

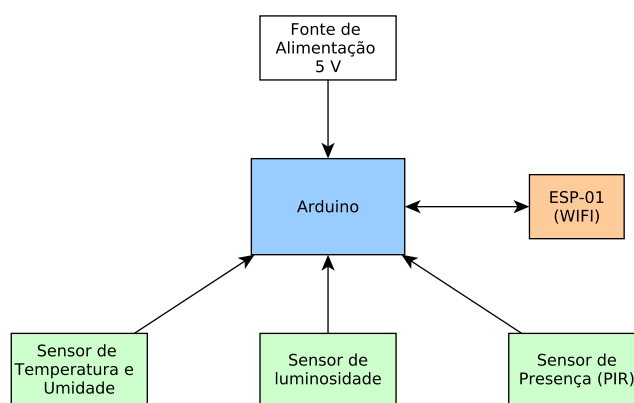
O método utilizado para controlar AC neste trabalho se baseou no método desenvolvido por [Cruz \(2013\)](#). No Apêndice D são mostradas as plataformas físicas de controle dos AC.

4.5.4 Subsistema IV - Monitoramento do Ambiente

O crescimento nas pesquisas relacionadas ao ambiente em CI tem produzido grandes mudanças no cotidiano das pessoas. Quando o assunto é conforto do ser humano, as principais variáveis monitoradas são: temperatura ambiente, umidade do ar e iluminação. Aparelhos de AC e aquecedores são utilizados para ajustar a temperatura ambiente para aumentar o conforto no ambiente. Porém, a umidade também desempenha um papel importante. Assim, às vezes o ar deve ser secado ou umidificado para que as condições de conforto sejam consideradas boas.

Neste trabalho, o sistema supervisor recebe informações do subsistema de monitoramento do ambiente. Na Figura 26 é mostrado o diagrama de blocos deste subsistema.

Figura 26 – Subsistema de monitoramento do ambiente



Fonte: O autor

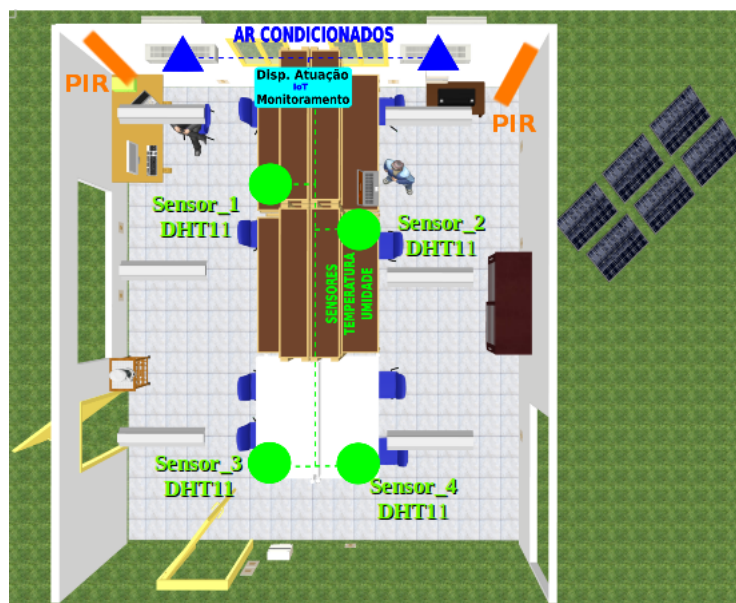
Os componentes utilizados neste subsistema são: dois sensores de luminosidade (LDR GL5528), quatro sensores de temperatura e umidade (DHT11) e dois sensores de presença (PIR DYP-ME003). Estes sensores estão conectados a um Arduino Mega.

Na Figura 27 é mostrada uma ilustração do ambiente da CI montada no LPE. Na ilustração, os círculos verdes representam a disposição dos sensores de temperatura e umidade (localizados nas bancadas do laboratório, próximo aos assentos), os triângulos azuis os dois aparelhos de AC, os retângulos laranja os sensores PIR e o retângulo azul claro o microcontrolador Arduino Mega que processa as informações recebidas dos sensores e as envia para o sistema supervisor utilizando o módulo WiFi ESP8266.

Sensores mal posicionados podem ocasionar o funcionamento incorreto do aparelho de AC. Os problemas resultantes podem ser: Falta de conforto, desperdício de energia ou desgaste excessivo do equipamento. As seguintes condições de instalação de um sensor dificultam a medição da temperatura num local (OLESON, 2017):

- Próximo de portas que são abertas com frequência (incluindo portas exteriores). Estas permitem que o ar externo interfira na leitura do sensor;

Figura 27 – Localização dos sensores e atuadores no LPE



Fonte: O autor

- Localizado ao longo ou atrás do equipamento que exala ar quente ou frio (equipamento de cozinha, equipamento de refrigeração, portas próximas, etc);
- No teto;
- Exposto à luz solar direta;
- Diretamente debaixo de ventiladores de teto;
- Muito próximo de dutos de aquecimento e refrigeração.

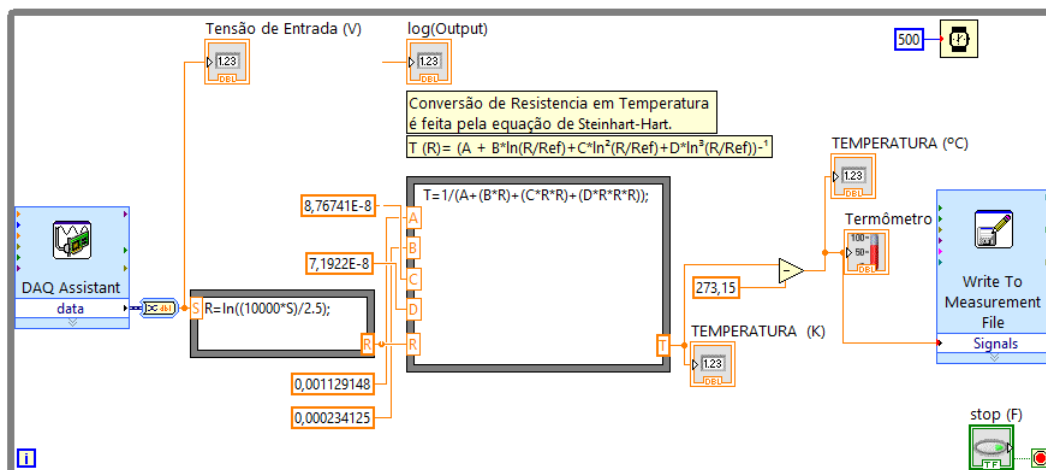
No Apêndice E são mostradas as ilustrações dos dispositivos utilizados na avaliação da posição dos sensores de temperatura no ambiente do LPE. Para isso, foi utilizada a plataforma LabVIEW com um módulo de aquisição de dados NI 6009 conectado a um sensor de temperatura NTC, um Arduino com DHT11 e a referência do sensor de temperatura do AC. O objetivo foi comparar a leitura dos diferentes sensores e utilizar um modelo de sensor que mais se aproxime da temperatura de referência no AC.

Durante a programação do funcionamento do sensor NTC com LabVIEW foi necessário realizar a conversão de resistência em temperatura. Para tanto, foi utilizada a equação de conversão de resistência em temperatura de Steinhart-Hart ou equação do termistor. A saída da temperatura da equação do termistor é dada em Kelvin (K).

Na Figura 28 é mostrado o programa desenvolvido para o NTC no LabVIEW. O programa é iniciado com a aquisição de valores de tensão na entrada do módulo de aquisição, em seguida os dados são tratados e aplicados à equação do termistor que converte

a resistência em temperatura, após isto os dados de saída da equação são apresentados em temperatura Kelvin (K) e são convertidos em (°C).

Figura 28 – Programa desenvolvido para o termômetro NTC no LabVIEW



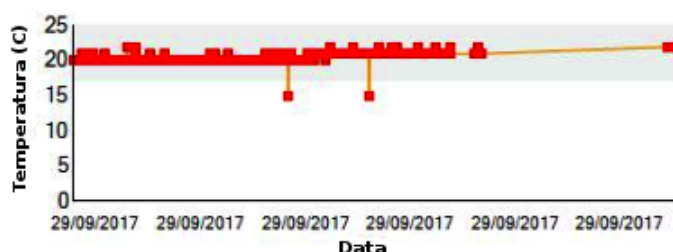
Fonte: O autor

O LabVIEW possui várias funcionalidades e possibilita a criação de interfaces de usuário (denominadas painéis frontais) no ciclo de desenvolvimento. Os programas do LabVIEW são denominados instrumentos virtuais (VI) e cada VI possui três componentes: um diagrama de blocos, um painel frontal e um painel de conectores.

O dados de monitoramento do ambiente do LPE foram adquiridos diariamente. Na Figura 29 é mostrado um exemplo dos dados de temperatura apresentados no sistema supervisorio Ayla. Além disso, também são apresentados os gráficos de umidade, presença, iluminação e irradiância.

Os testes de validação do sensor de temperatura a ser utilizado no ambiente do LPE (CI) foram realizados utilizando dois cenários: 1) apenas um AC ligado e 2) com dois AC ligados.

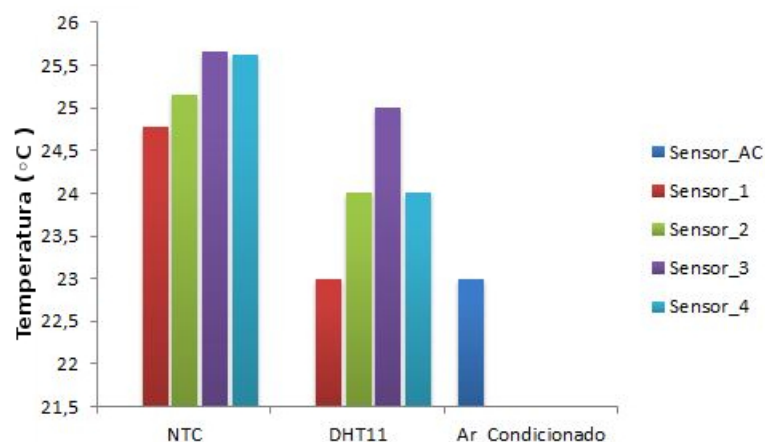
Figura 29 – Exemplo de gráfico de temperatura do sistema supervisorio



Fonte: O autor

Na Figura 30 são apresentados os valores de temperatura medidos pelos sensores NTC e DHT11 no ambiente do LPE com um AC ligado. O sensor que obteve menor variação da temperatura em relação ao valor mostrado no visor do AC foi o DHT11. Na Figura 27 é mostrado o posicionamento dos sensores de temperatura no LPE.

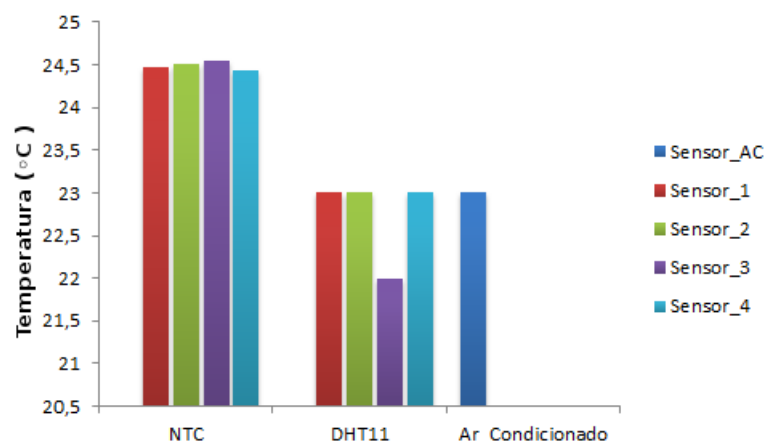
Figura 30 – Valores de temperatura medidos pelos sensores NTC e DHT11 para um AC ligado



Fonte: O autor

Em seguida foram realizados testes com os dois AC ligados e a mesma disposição de sensores do teste anterior. Os resultados obtidos confirmaram que, neste trabalho, o sensor DHT11 deveria ser utilizado no ambiente de uma CI. Na Figura 31 são mostrados os valores de temperatura medidos pelos sensores para dois AC ligados.

Figura 31 – Valores de temperatura medidos pelos sensores NTC e DHT11 para dois AC ligados



Fonte: O autor

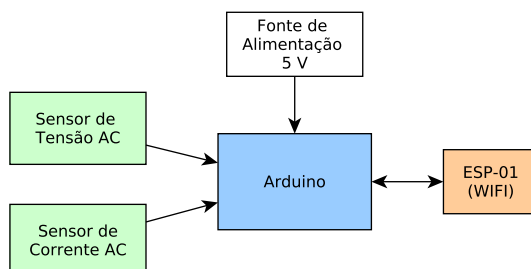
4.5.5 Subsistema V - Monitoramento da Rede Elétrica

O monitoramento da rede elétrica se baseia na medição dos parâmetros elétricos tensão, corrente e potência. numa interface visual para o consumidor. Estas informações e o consumo de energia são visíveis num IHD do sistema supervisorio instalado numa CI.

No monitoramento da rede elétrica no LPE foram utilizados sensores de tensão e de corrente conectados a um microcontrolador Arduino. Na Figura 32 é mostrado o

diagrama de blocos desse subsistema.

Figura 32 – Subsistema de monitoramento da rede elétrica

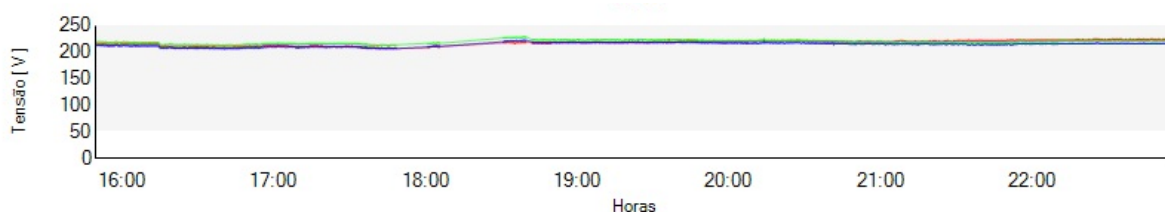


Fonte: O autor

No Apêndice F é mostrada a ilustração do projeto físico de monitoramento da rede elétrica no LPE. Além disso, são mostrados o circuito de monitoramento e o medidor de qualidade de energia, marca Homis, modelo HAE-303 que foi utilizado na validação dos dados de monitoramento. Vale ressaltar que este aparelho possui um *datalogger*.

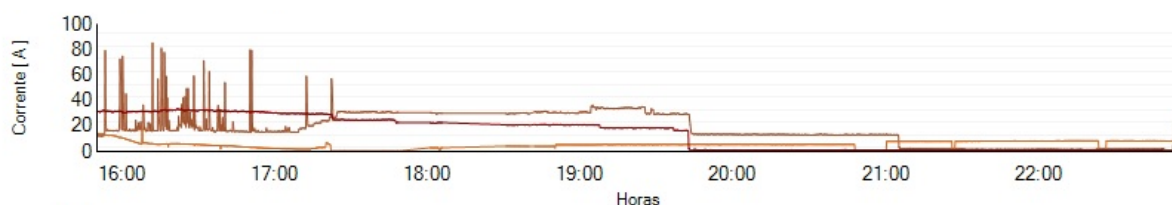
No sistema supervisorio Ayla os dados de monitoramento são armazenados num banco de dados. Além disso, o consumidor pode visualizar, na forma de gráficos, os resultados de monitoramento. Nas Figuras 33, 34 e 35 são mostrados os gráficos gerados pelo sistema supervisorio para os dados de monitoramento.

Figura 33 – Monitoramento da rede elétrica - Tensão (V)



Fonte: O autor

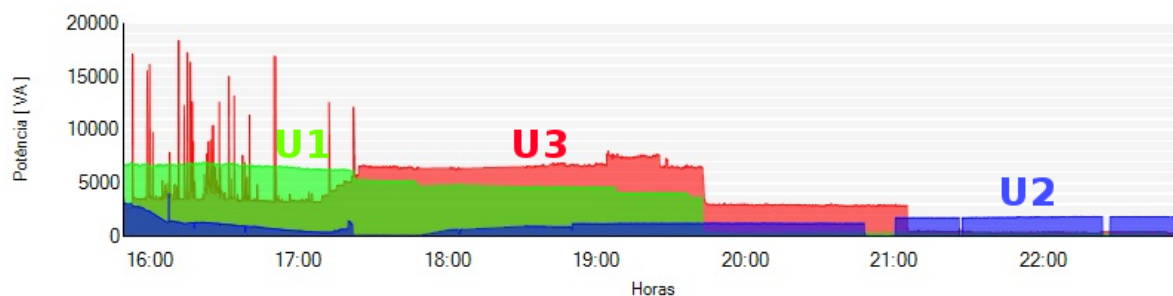
Figura 34 – Monitoramento da rede elétrica - Corrente (A)



Fonte: O autor

Sendo a rede elétrica do LPE trifásica, as referências de cada medição, de tensão ou corrente, por fase são descritas conforme a seguinte convenção: U1 corresponde à Fase 1, U2 à Fase 2 e U3 à Fase 3. Na Figura 35 é ilustrada essa convenção.

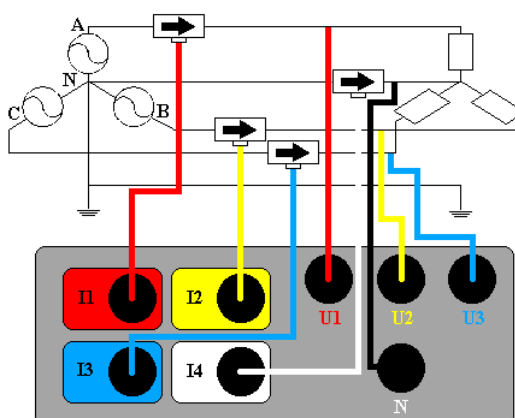
Figura 35 – Monitoramento da rede elétrica - Potência aparente (VA)



Fonte: O autor

Para validar subsistema de monitoramento da rede elétrica, foi utilizado um medidor de qualidade de energia para analisar os parâmetros da rede elétrica em tempo real. Este dispositivo foi adicionado à infraestrutura de testes no LPE. Na Figura 36 é mostrado o seu esquema de ligação à rede elétrica do LPE.

Figura 36 – Esquema de ligação do medidor de qualidade de energia



Fonte: Adaptado de [Homis \(2018\)](#)

Na Figura 37 são apresentados, respectivamente, os resultados das medições realizadas utilizando o medidor de qualidade de energia e o subsistema de monitoramento da rede elétrica. Com base nos resultados obtidos nas duas medições concluiu-se que o subsistema de monitoramento da rede elétrica pode ser utilizado neste trabalho.

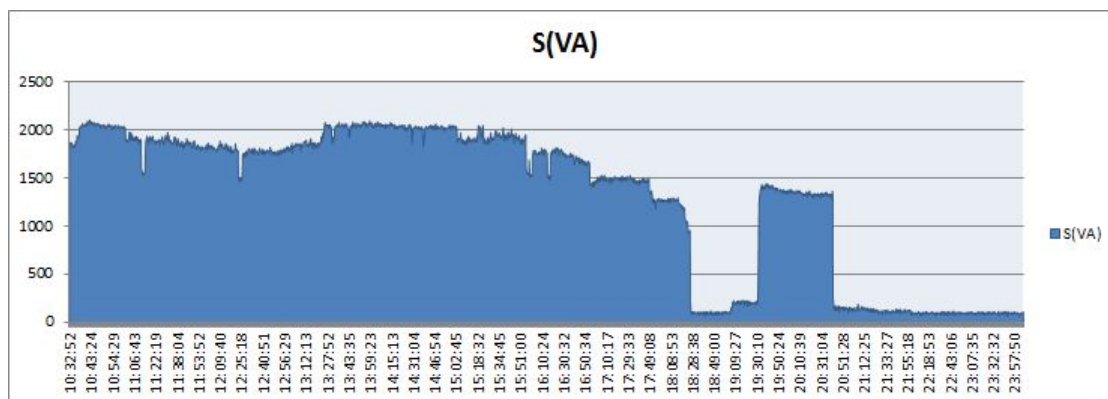
4.5.6 Subsistema VI - Monitoramento da Energia Solar FV

O monitoramento da energia solar FV foi desenvolvido com a finalidade de adquirir dados de tensão e corrente dos painéis e do Banco de Baterias (BB). Com esses dados foi possível calcular a potência fornecida pelos painéis FV e o Estado de Carga (SoC) do BB.

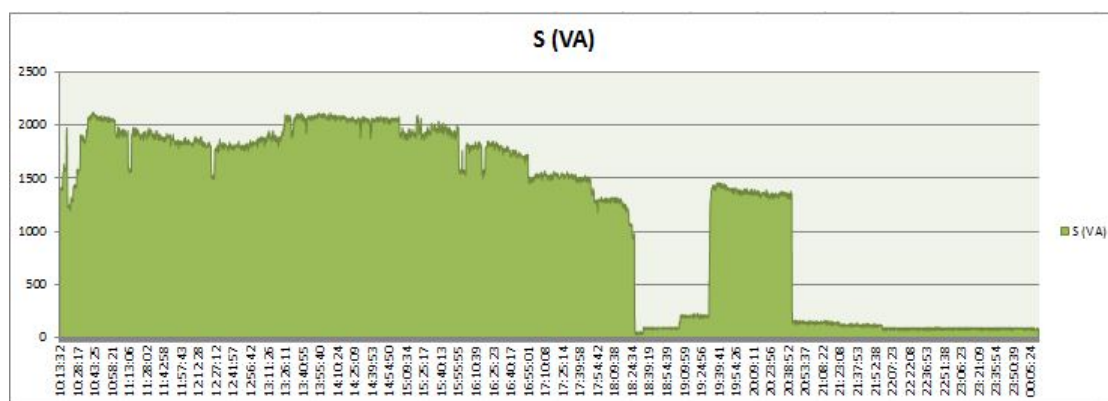
Na Figura 38 é mostrado o diagrama de blocos desse subsistema.

Figura 37 – Medição de potência aparente

(a) Utilizando o medidor de qualidade de energia

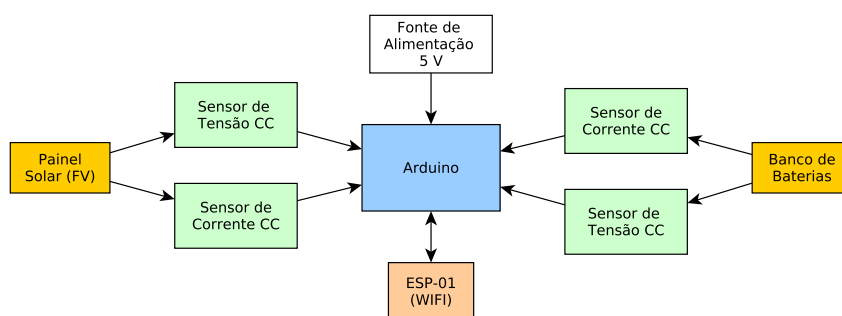


(b) Utilizando o subsistema de monitoramento da rede elétrica



Fonte: O autor

Figura 38 – Subsistema de monitoramento da energia solar FV

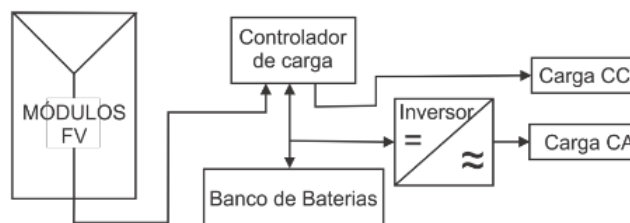


Fonte: O autor

No LPE foram montadas dois subsistemas de geração solar FV os quais, neste trabalho, foram denominadas FV1 e FV2. Esses subsistemas estão em operação e foram projetados para funcionar de forma isolada da rede elétrica (*Off-Grid*). As exigências para sistemas *Off-Grid* são pequenas se comparadas às exigências em sistemas conectados à rede elétrica (*On-Grid*). Por exemplo, os inversores para sistemas FV *Off-Grid* são geralmente mais baratos do que os para sistemas *On-Grid*, pois este último possui características específicas para atender às exigências das concessionárias de energia com relação à segurança

e qualidade da energia fornecida (SANTOS, 2017). Na Figura 39 são mostrados os principais componentes e suas conexões num sistema FV *Off-Grid*.

Figura 39 – Principais componentes do sistema FV



Fonte: Adaptado de Santos (2017)

No Apêndice G são mostrados os componentes e as suas conexões do módulo de monitoramento dos subsistemas FV utilizados neste trabalho. Este módulo é composto por um microcontrolador Arduino, sensores de corrente (ACS712), fontes de alimentação de 3,3 V e 5 V, divisores de tensão CC e um módulo WiFi ESP8266-01. Além disso, são mostrados os painéis elétricos dos subsistemas FV e o BB e os painéis FV do subsistema FV2.

O subsistema FV1 foi adicionado ao projeto para uso opcional pelo consumidor. Um inversor de onda quadrada (com potência nominal de 1000 W, tensão de entrada de 12 V_{CC} e tensão de saída de 220 V_{CA}) foi disponibilizado para uso diário. Além disso, o subsistema FV1 possui um BB e um controlador de carga.

A montagem do subsistema FV2 é resultado de um projeto realizado no LPE por Santos (2017). Este subsistema foi utilizado para fornecer energia para o sistema de iluminação do LPE. O subsistema de iluminação do LPE é composto por 12 lâmpadas LED de 18 W cada com o uso médio diário de 8 horas. Portanto, o consumo de energia das lâmpadas é de 1728 Wh/dia. Esse parâmetro foi utilizado no cálculo da energia ativa fornecida pelo BB. Para fornecer energia para o sistema de iluminação do LPE foi utilizado um inversor *Off-Grid* de onda senoidal, marca Hayonik, com as seguintes características:

- Tensão de entrada: 15 V_{CC} (máximo)/11 V_{CC} (mínimo);
- Proteção com desligamento automático;
- Tensão de saída: 220 V ± 10 % RMS;
- Frequência: 60 Hz ± 3 Hz;
- Forma de onda: Senoidal;
- Consumo: 0,4 A;
- Eficiência: 80 %;

- Temperatura: 0 °C a 65 °C;
- Potência nominal: 1000 W.

Os painéis FV utilizados neste subsistema são de fabricação Kyocera modelo KD140SX-UFBS. O arranjo FV foi montado com 6 painéis conectados em paralelo. As características técnicas de cada painel são:

- Potência máxima (P_{MP}): 140 Wp (Watt-pico);
- Tensão de potência máxima (V_{MP}): 17,70 V;
- Corrente de potência máxima (I_{MP}): 7,91 A;
- Tensão de circuito aberto (V_{OC}): 22,10 V;
- Corrente de curto-circuito (I_{SC}): 8,68 A.

As condições de teste dos fabricantes são as *Standard Test Conditions* (STC) com os seguintes valores: Irradiância de 1.000 W/m²; massa de ar (AM) de 1,5 e temperatura de 25 °C no painel.

Segundo Santos (2017), no projeto de um sistema solar FV *Off-Grid* a capacidade nominal do BB utilizado é calculada utilizando os seguintes parâmetros específicos:

- Consumo da carga conectada ao BB: 1728,00 Wh/dia;
- Autonomia do BB: 1 dia;
- Tensão nominal do BB: 12 V;
- Profundidade de descarga no final da autonomia: 25 %; e
- Energia ativa: 2.363,89 Wh/dia.

Portanto, a capacidade do BB é:

$$Capacidade = \frac{2.363,89 \times 1}{12 \times 0,25} = 787,96 \text{ Ah}$$

As baterias estacionárias disponíveis no LPE são da marca Moura, modelo 12MF150 e tipo estacionárias. Na Tabela 7 são mostradas as características de cada bateria.

Tabela 7 – Características elétricas e construtivas da bateria Moura 12MF150

Tensão Nominal (V)	Capacidade a 25 °C(Ah)	Dimensões (mm)	Peso (Kg)	Icc (A)	$R_{int}(mOhm)$
12	150 (p/20h-1,75 V/Elem)	509 × 211 × 246	43,70	4013	3,10

Fonte: Adaptado de Moura (2018)

Por recomendação do fabricante, para este modelo de bateria não se deve ultrapassar a quantidade de seis baterias em paralelo. Assim, a capacidade nominal do BB do subsistema FV2 é de 900,00 Ah (6 x 150 Ah).

4.5.7 Subsistema VII - Piranômetro

Com base na medição da irradiância solar² de um local, pode-se definir uma boa localização para instalação de um sistema de geração solar FV, avaliar a eficiência da geração e tomar decisões no gerenciamento de energia. Segundo [Hidalgo, Martinez e Vidal \(2014\)](#), existem três tipos de dispositivos para medir a irradiância solar sobre a superfície da Terra, os piranômetros (irradiância solar direta e difusa), os pireliômetros (irradiância solar direta) e os albedômetros (irradiância solar refletida).

Devido o tipo de aplicação, o preço desses dispositivos representa um custo alto para o processo de coleta de dados, especialmente para instituições sem fins lucrativos, como escolas ou universidades públicas. Por esse motivo, neste trabalho é apresentado o projeto de um piranômetro de baixo custo e que apresenta desempenho e precisão semelhantes aos dos dispositivos comerciais.

Em [Patil, Haria e Pashte \(2013\)](#) é desenvolvido um piranômetro baseado em fotodiodo. Segundo o autor, o dispositivo pode ser comparado a um piranômetro comercial baseado em termopilha, cujo preço é muito mais alto.

Outra proposta de piranômetro é apresentada por [Hidalgo, Martinez e Vidal \(2014\)](#), que desenvolveram um sensor de baixo custo para medir a irradiância solar no norte do Chile. A característica principal do sensor é o baixo custo dos seus componentes. O projeto do sensor é baseado no uso de um fototransistor PT202C. Este dispositivo possui uma boa sensibilidade para este tipo de medição. No trabalho os autores também apresentam algumas alternativas para o uso de componentes que se assemelham ao funcionamento como fotodiodos, resistências de detecção de luz (LDR)³ e fototransistores. A seleção é tomada com base nas características técnicas de cada um.

No LPE foi desenvolvido um piranômetro, utilizando um LDR como sensor. O LDR é um componente eletrônico passivo, mais especificamente, um resistor cuja resistência varia conforme a intensidade da luz que incide sobre ele. Um protótipo foi construído para aquisição dos dados de irradiância, sendo comparado com os dados obtidos utilizando um piranômetro comercial SL200 da KIMO. No Apêndice G é mostrado o circuito eletrônico do piranômetro.

O piranômetro foi utilizado, durante os experimentos, como sensor conectado a um Arduino que grava as informações em um módulo *datalogger* com cartão SD - do inglês

² Irradiância solar é o valor instantâneo da radiação solar incidente (W/m^2). Irradiação solar é a integral temporal da irradiância solar (Wh/m^2).

³ Do inglês *Light Dependent Resistor*.

Secure Digital.

O piranômetro baseado em LDR não tem como objetivo a medição precisa da irradiância. Uma vez que a sua resposta espectral coincide significativamente com a irradiância solar, o LDR pode ser utilizado para avaliação da tendência de variação da irradiância (MARANHÃO et al., 2015).

Uma Rede Neural Artificial (RNA) foi utilizada como método de regressão não linear para obter uma resposta semelhante a um piranômetro comercial. Redes neurais podem ser usadas com sucesso na resolução de problemas complexos que incluem o reconhecimento de padrões, identificação, classificação e aproximações de funções (regressão) (ZANETTI et al., 2008; HASNI et al., 2012).

Dentre os mais diversos tipos de RNA, a *Multilayer Perceptron* (MLP) foi escolhida e treinada para processar os dados adquiridos do sensor. Assim, para esta MLP foi desenvolvido um módulo no supervisor Ayla que faz o processamento dos dados do piranômetro, em volts, e na saída apresenta os resultados em W/m^2 .

4.6 *Software* do Sistema

O sistema supervisor Ayla foi desenvolvido para o SGE de uma CI que foi montada e testada no LPE.

4.6.1 Sistema Supervisor (Ayla)

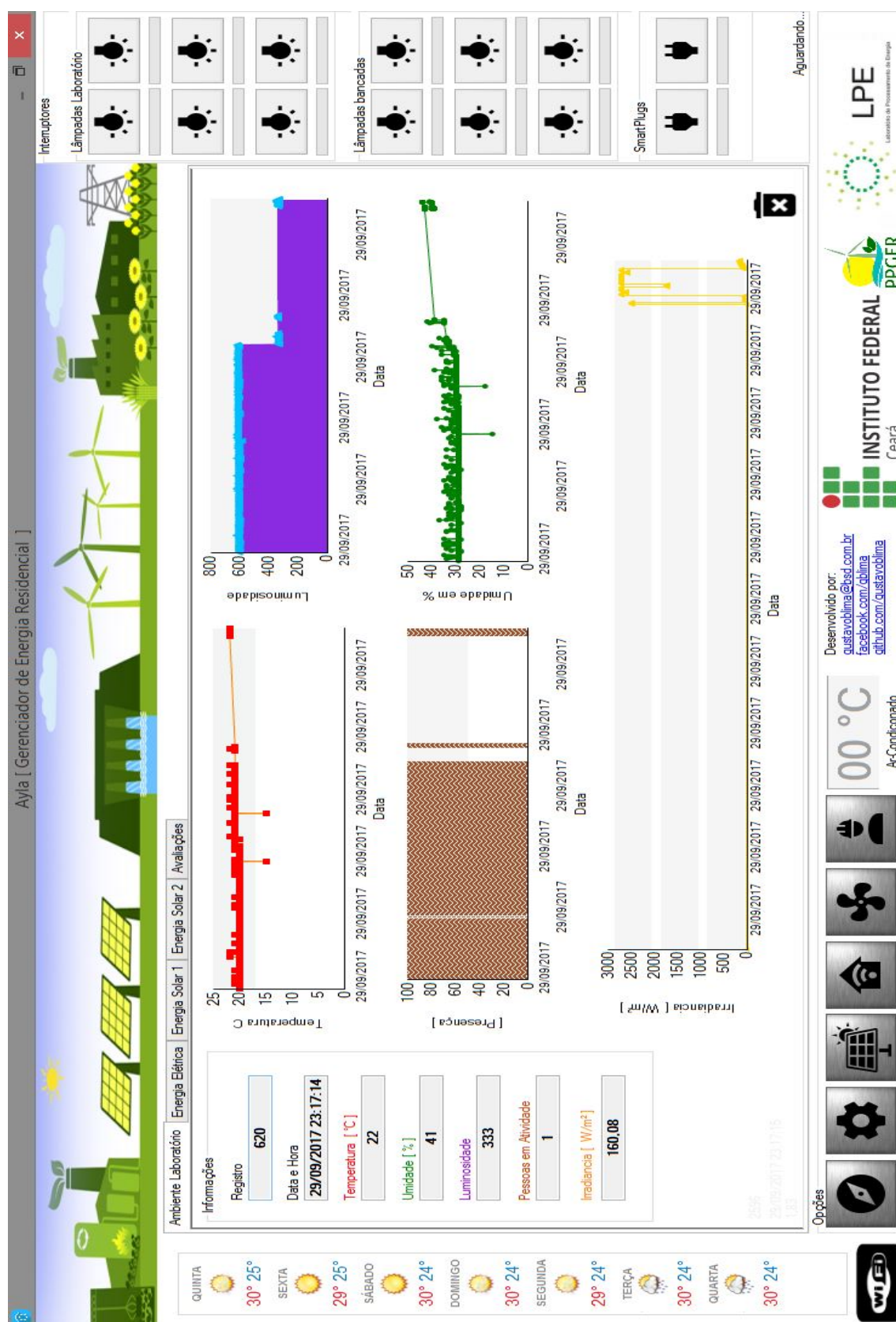
O sistema supervisor Ayla é o componente chave do SGE desenvolvido neste trabalho. Ele é responsável pela integração dos diversos subsistemas descritos anteriormente, gerenciamento de energia e conforto da CI e apresentação das informações ao usuário. Na Figura 40 é mostrada a *interface* gráfica do Ayla.

A filosofia implantada no Ayla tem como objetivo atender as necessidades dos consumidores numa CI. Por exemplo, quando existir disponibilidade de energia solar FV, o Ayla poderá mudar a fonte de energia, de convencional para solar FV, para alimentar o subsistema de iluminação da CI. Além disso, o Ayla possibilita a visualização dos valores das variáveis monitoradas e o consumo de energia.

Conforme mostrado na Figura 40, na parte superior superior da *interface* existem cinco abas: Ambiente Laboratório, Energia Elétrica, Energia Solar 1, Energia Solar 2 e Avaliações. Para cada aba está associada uma janela específica. Na Figura 40 está sendo mostrado a janela da aba Ambiente Laboratório.

Na *interface* gráfica do Ayla existem botões para a operação pelo usuário em modo manual. Por exemplo, os botões (com lâmpadas) no lado direito são utilizados para

Figura 40 – Interface gráfica do sistema supervisor Ayla



Fonte: O autor

ligar/desligar as lâmpadas do subsistema de iluminação da CI e um pouco mais abaixo existem dois botões responsáveis pelo controle dos *Smart plugs*.

Na parte inferior da *interface* existem botões para ativar as seguintes funções: navegação *web* (figura de uma bússola), janela de configuração e opções de uso do sistema (figura de uma engrenagem), utilização da fonte solar FV de forma manual (figura de um painel FV), teste de comunicação (figura de uma casa com sinal WiFi), controle dos AC (figura de uma hélice), créditos (figura de um usuário) e o indicador da temperatura configurada pelo consumidor nos AC. Na lateral esquerda são mostradas as informações armazenadas no banco de dados a cada intervalo de tempo e a previsão do tempo.

No Apêndice H é mostrado um exemplo da tela de previsão do tempo que está localizada na área lateral esquerda do Ayla. Estas informações são adquiridas de um servidor externo e interpretadas na aplicação por meio do navegador Mozilla. Para isso foi necessário a adaptação das bibliotecas do código fonte do Mozilla para esta funcionalidade ser implementada. Além disso, são mostradas as informações de configuração do SGE. Nesta janela são apresentados os valores de ajustes do sistema, podendo ser utilizada para configurar prioridade do uso de cargas, definir o limite de consumo elétrico em kW, escolher o algoritmo a ser utilizado pelo SGE e o controle dos AC.

Os testes de comunicação podem ser realizados de forma manual sendo possível a visualização do *status* de transmissão de dados de cada dispositivo (objeto) da HAN. A ativação do botão “Testar” provoca o envio de pacotes ICMP a todos os dispositivos da rede. Para validar deste teste foi utilizado a ferramenta *Zabbix*. O Ayla pode ser utilizado em computadores *desktop*, *notebooks* e *tablets* que suportem o NET *framework*.

4.7 Análise dos Requisitos

No desenvolvimento de uma aplicação de médio porte, geralmente a lista de requisitos é extensa e deve ser documentada de forma mais cautelosa. A seguir, são apresentados os requisitos funcionais e não funcionais utilizados no desenvolvimento do sistema supervisor Ayla.

- Requisitos funcionais formalizados para o desenvolvimento do sistema Ayla:
 - O sistema deverá ter uma tela de acesso com as opções de login e cadastro.
 - O sistema deverá ter uma área de configurações para que o consumidor possa definir o limite de consumo em kW e o nível de conforto térmico e visual desejados para o ambiente da CI.
 - O sistema deverá ter uma área para os gráficos das variáveis de monitoramento do ambiente.

- O sistema deverá ter uma área para os gráficos das variáveis de monitoramento da energia elétrica fornecida pela concessionária.
- O sistema deverá ter uma área para os gráficos das variáveis de monitoramento da energia solar FV1.
- O sistema deverá ter uma área para os gráficos das variáveis de monitoramento da energia solar FV2.
- O sistema deverá ter uma área para as avaliação e cálculos do SGE. Nesta área serão mostrados a previsão mensal de consumo de energia, a classificação de eficiência e o consumo diário em kWh.
- O sistema também deverá utilizar um módulo de rede neural artificial para processar informações enviadas pelo piranômetro.
- O sistema deverá receber dados de consumo de eletrodomésticos e armazená-los num banco de dados MySQL.
- O sistema deverá permitir que consumidor possa atualizar o valor da tarifa de energia elétrica em R\$/kWh.
- O sistema deverá gerar gráficos comparativos das contas de energia elétrica.
- O sistema deverá ter um módulo de teste de comunicação com suporte ao protocolo ICMP. Dessa forma, cada subsistema/dispositivo adicionado ao sistema poderá ser reconhecido pelo seu *status* de funcionamento.
- O sistema deverá permitir ao consumidor ativar/desativar manualmente o uso de energia solar FV substituindo a energia elétrica convencional.
- O sistema deverá permitir ao consumidor configurar e visualizar a temperatura aplicada ao ambiente pelos AC.
- O sistema deverá disponibilizar botões para ligar/desligar os eletrodomésticos conectados aos *Smart plugs*.
- O sistema deverá ler os dados gravados no banco de dados MySQL. Os dados são: Data/hora, número do registro, SoC, tensão, correntes, energia, tensão do piranômetro, luminosidade, presença de pessoas, umidade e temperatura.
- O sistema deverá permitir que o usuário possa interagir diretamente com o BD. Se achar necessário poderá excluir os dados do BD e com isso, limpar o gráfico respectivo. Todos os subsistemas deverão se comunicar e se integrar ao Ayla utilizando uma rede WiFi padrão *IEEE 802.11g/n*.
- O sistema deverá ter uma tela de créditos da equipe que contribuiu para o desenvolvimento deste projeto.

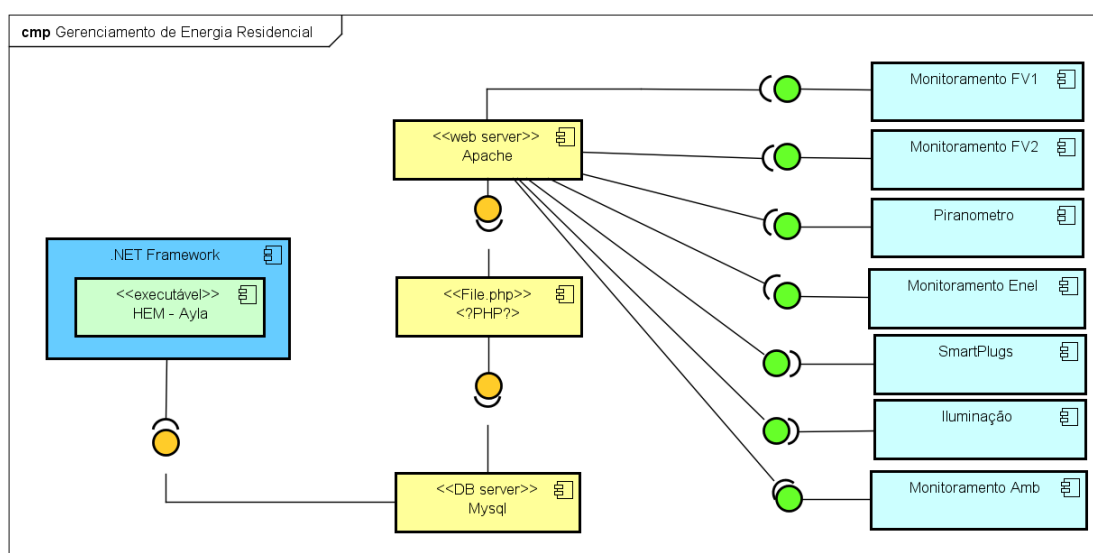
- Requisitos não funcionais formalizados para o desenvolvimento do sistema Ayla:

- O sistema deverá funcionar utilizando a plataforma *.NET Framework* da Microsoft com o objetivo de facilitar o desenvolvimento e manutenção.
- O sistema deverá utilizar uma interface amigável, principalmente na consulta de informações, pois pode ser utilizado por consumidores leigos no dia a dia.
- O sistema deverá permanecer disponível, ou seja em funcionamento, a maior parte do tempo.

4.7.1 Modelagem UML do Sistema Supervisório Ayla

Para demonstrar todas as funcionalidades do sistema supervisório Ayla, foi utilizado, ainda no início do desenvolvimento, a UML. Na Figura 41 é mostrado o Diagrama dos Componentes do SGE.

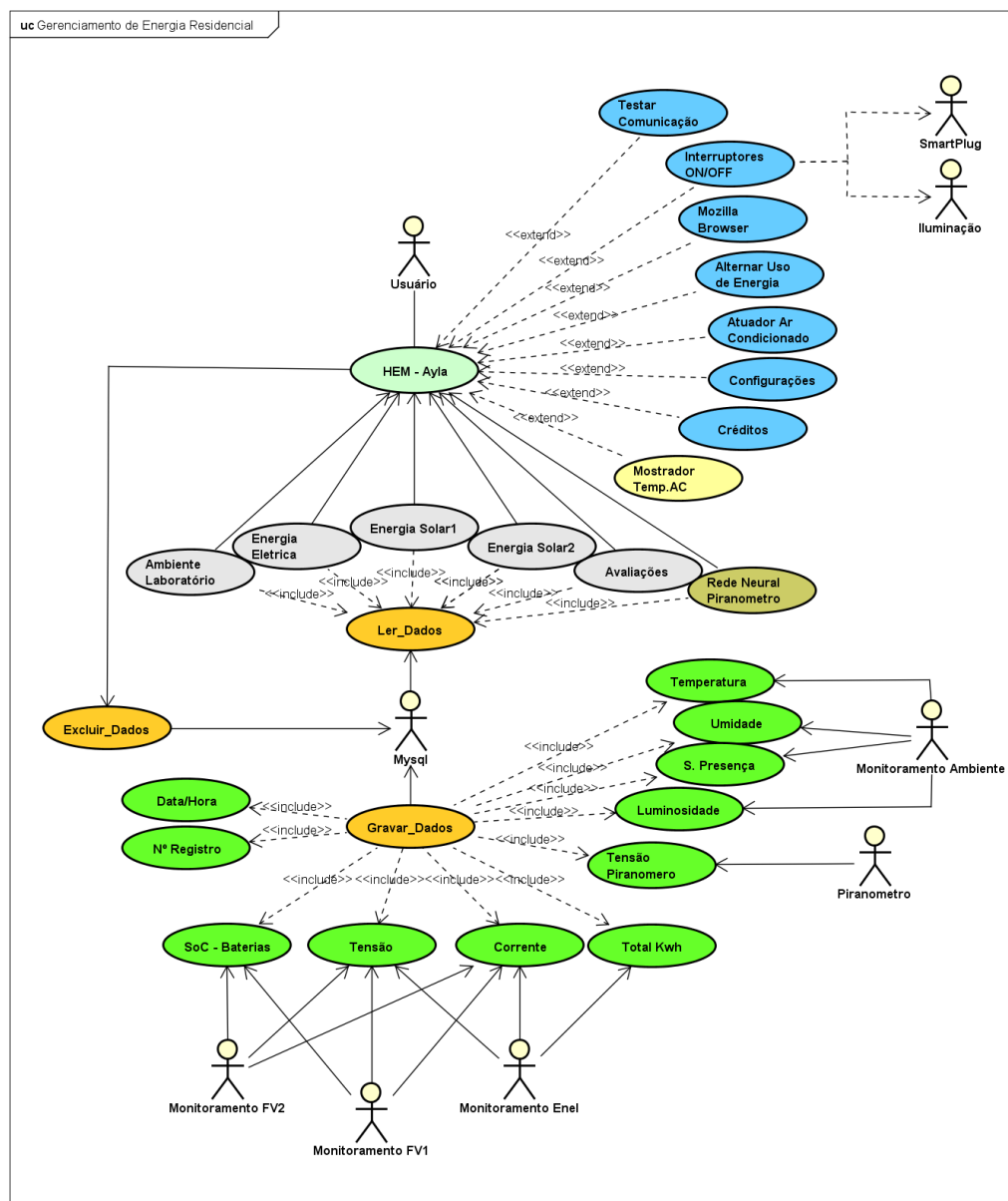
Figura 41 – Diagrama de Componentes do SGE



Fonte: O autor

Além disso, foi utilizado o Diagrama de Casos de Uso para modelar as funcionalidades propostas. Na Figura 42 é mostrado o Diagrama de Casos de Uso do sistema supervisório Ayla. Neste diagrama os botões do sistema supervisório estão nas elipses de casos de uso na cor azul, o mostrador da temperatura do AC está na elipse de caso de uso na cor amarela. Logo abaixo, na cor cinza estão as elipses de casos de uso que são consideradas as abas de monitoramento de cada subsistema empregado neste trabalho, além do módulo da rede neural do piranômetro na cor dourada. Na cor laranja estão as elipses de casos de uso que envolvem as operações com o BD e por fim as informações que são gravadas no BD na cor verde claro.

Figura 42 – Diagrama de Casos de Uso do Sistema Ayla



Fonte: O autor

4.8 Algoritmos de Operação - Modelagem em RP

No desenvolvimento do sistema supervisor Ayla, devido o processamento de tarefas concorrentes, foi adotada a técnica de multiprocessamento, do inglês *multithread*. Segundo Kavi, Moshtaghi e Chen (2002), uma aplicação concorrente é vulnerável a um conjunto especial de falhas resultante de:

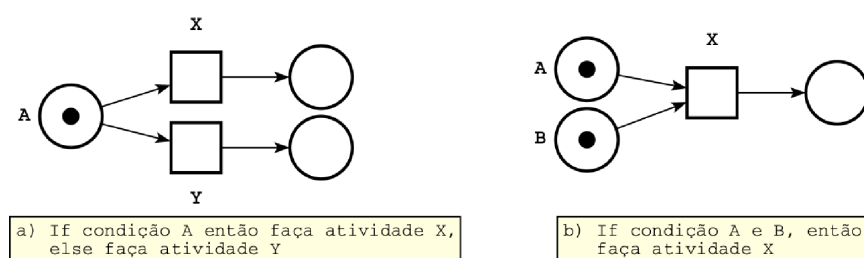
- Sincronização inadequada (*Improper Synchronization*): O *software* tenta usar um recurso compartilhado de maneira exclusiva, mas não impede ou impede incorretamente o uso do recurso por outra *thread* ou processo.
- Bloqueio (*Deadlock*): Pode ocorrer quando múltiplos processos compartilham recursos

e operações dentro de um processo que exige acesso para mais de um dos recursos. É uma situação em que ocorre um impasse entre dois ou mais processos e ficam impedidos de continuar suas execuções.

- Inanição (*Starvation*): É um problema encontrado em computação concorrente, em que um processo nunca é executado por conta de outros processos, com maior prioridade, que impedem a sua execução.
- Sinais perdidos (*Lost Signals*): Em sistemas multiprocessados, as *threads* também podem interagir usando sinais para realizar a comunicação da ocorrência de determinados eventos ou condições. Em outras palavras, se um sinal chegar antes que qualquer *thread* execute uma “espera” para esse sinal, o sinal é perdido, fazendo com que a *thread* em espera seja bloqueada indefinidamente.
- Condições de corrida (*Race Conditions*): Ocorre quando duas ou mais *threads* podem acessar dados compartilhados e tentam alterá-los ao mesmo tempo.

Os modelos RP dos algoritmos propostos para o SGE da CI montada no LPE foram criados utilizando construtores primitivos de programação estruturada. Segundo Halder (2006) e Kavi, Moshtaghi e Chen (2002) esses construtores primitivos são: *If Else*, *loop*, *switch* e *FunctionCall*. A programação estruturada pode ser modelada em RP e uma instrução *switch*, por exemplo, pode ser modelada usando vários *If Else* sendo conectados para representar o fluxo de controle ou a ordem de execução das declarações de um programa computacional. Na Figura 43 são mostrados dois exemplos de modelagem em RP utilizando construtores primitivos de programação.

Figura 43 – Exemplos de modelagem em RP utilizando construtores primitivos



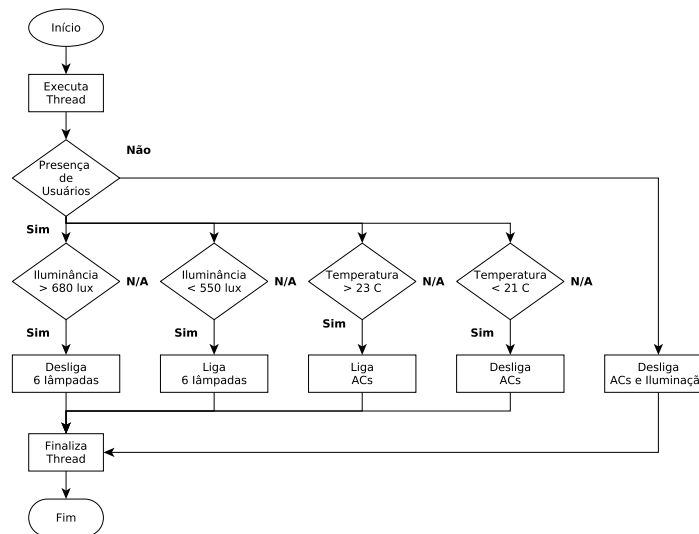
Fonte: O autor

Os algoritmos de operação do SGE foram desenvolvidos para atender o seguintes requisitos: Reduzir o consumo de energia elétrica, melhorar a eficiência energética e os confortos térmico e visual do usuário de uma CI. Os testes de validação realizados no LPE para cada algoritmo são apresentados no Capítulo 5. A ferramenta Time petri Net Analyzer (TINA) foi utilizada na criação, simulação e análise dos modelos RP de cada algoritmo. A seguir, são apresentados cada um dos algoritmos utilizados no SGE e seus respectivos modelos RP.

4.8.1 Algoritmo I - Condições do Ambiente

Na Figura 44 é apresentado o algoritmo adaptado de (KI et al., 2016) e que leva em consideração as variáveis físicas do ambiente de uma CI. Dessa forma, os modos de operação da CI dependem das informações fornecidas pelos sensores de presença, de iluminância, de temperatura e umidade. Os modos de operação baseiam-se em ligar/desligar as lâmpadas do subsistema de iluminação e os aparelhos de ar condicionado.

Figura 44 – Algoritmo de Operação I - Condições Ambientais



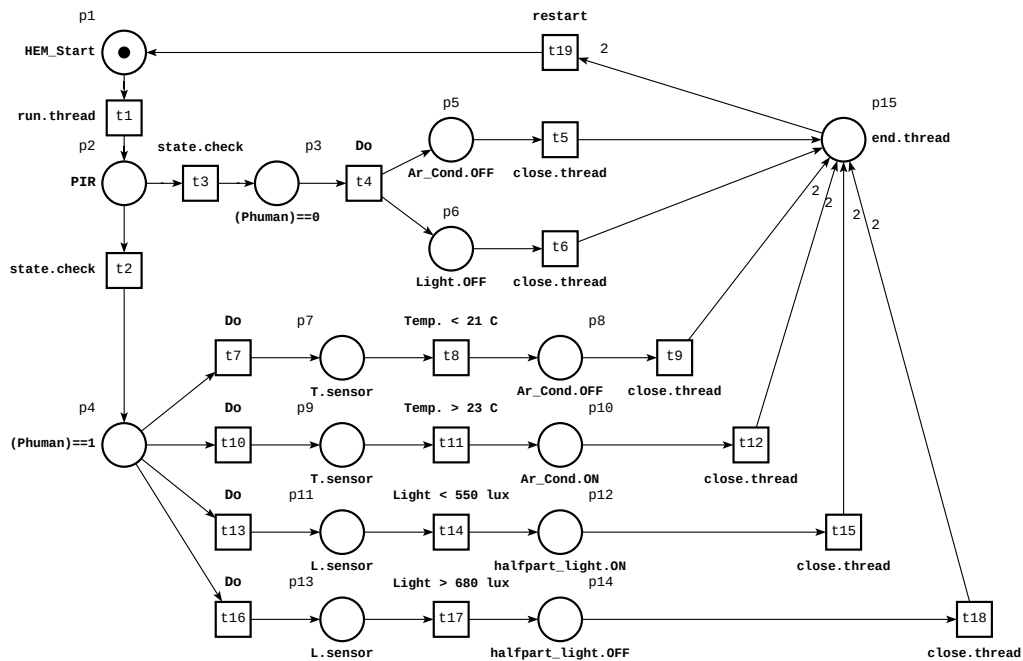
Fonte: O autor

De acordo com esse algoritmo a *thread* é iniciada, verifica se há pessoas no ambiente, verifica os padrões das condições de temperatura e iluminância com base em valores pré-estabelecidos. Em seguida, é determinado o estado de funcionamento ligado/desligado do AC e lâmpadas do LPE. Por exemplo, para uma temperatura no ambiente de 23 °C o AC é ligado, sendo mantido nessa condição até que a temperatura alcance o valor de 21 °C, quando ele é desligado. Da mesma forma os valores de iluminância do ambiente foram definidos dentro de uma faixa de 550 a 680 lux. Porém, os valores dentro dessa faixa definem os estado de funcionamento das lâmpadas.

Com o objetivo de validar o Algoritmo I, foi criado um modelo RP para o mesmo. Na Figura 45 é apresentado o modelo RP.

Para o modelo RP mostrado na Figura 45, a ferramenta TINA calculou o grafo alcançabilidade e as respectivas marcações, mostrados na Tabela 8, e forneceu os seguintes resultados de análise para a RP: limitada, viva e reversível. Os resultados de avaliação do Algoritmo I são apresentados na Seção 5.4.2.

Figura 45 – Modelo RP do Algoritmo I



Fonte: O autor

Tabela 8 – Marcações e grafo de alcançabilidade da RP do Algoritmo I

Marcações (estados): 16	Eventos (transições): 21
0 : p1	0 → t1/1
1 : p2	1 → t2/2, t3/3
2 : p4	2 → t10/4, t13/5, t16/6, t7/7
3 : p3	3 → t4/8
4 : p9	4 → t11/9
5 : p11	5 → t14/10
6 : p13	6 → t17/11
7 : p7	7 → t8/12
8 : p5 p6	8 → t5/13, t6/14
9 : p10	9 → t12/15
10 : p12	10 → t15/15
11 : p14	11 → t18/15
12 : p8	12 → t9/15
13 : p15 p6	13 → t6/15
14 : p15 p5	14 → t5/15
15 : p15*2	15 → t19/0

Fonte: O Autor

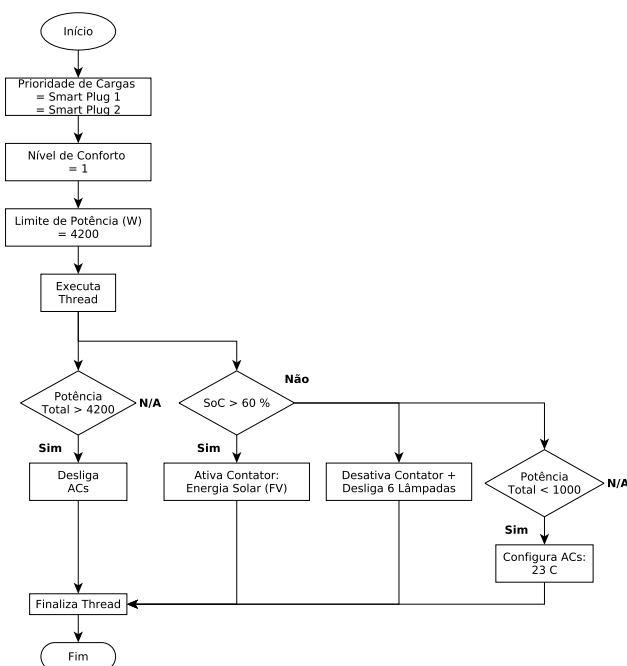
4.8.2 Algoritmo II - Integração de Energias Renováveis

Este algoritmo, que se baseia no trabalho apresentado por [Saha et al. \(2014\)](#), leva em conta o gerenciamento de energia em CI integrado com energias renováveis. As características principais desse algoritmo são: O uso da energia armazenada como alternativa de consumo, o desligamento de cargas excessivas, a manutenção da demanda atual da CI abaixo de um limite estabelecido, levando em consideração a prioridade de determinadas cargas e o nível de conforto desejado pelo consumidor ([SAHA et al., 2014](#)).

Nas Figuras 46, 47 e 48 são apresentadas os três modos de operação para esse algoritmo. Cada modo de operação foi definido da seguinte maneira:

- Modo de operação 1:
 - Cargas prioritárias: *Smart plugs* 1 e 2.
 - Nível de conforto: 1.
 - Limite de potência: 4200 W.
- Modo de operação 2:
 - Cargas prioritárias: *Smart plug* 1 e Iluminação.
 - Nível de conforto: 2.
 - Limite de potência: 4200 W.
- Modo de operação 3:
 - Cargas prioritárias: ACs e Iluminação.
 - Nível de conforto: 3.
 - Limite de potência: 4200 W.

Figura 46 – Algoritmo II - Modo de operação 1

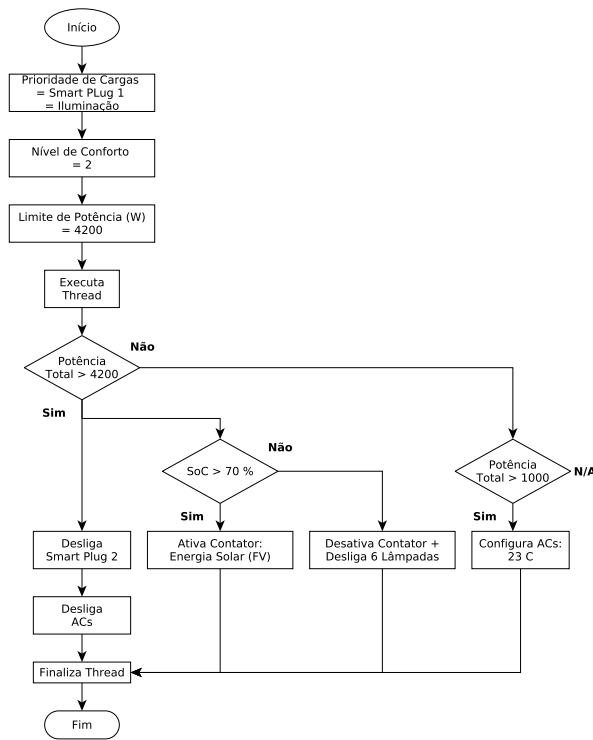


Fonte: O autor

De acordo com o Algoritmo II, após o consumidor realizar as configurações iniciais a *Thread* é iniciada. Esta verifica se a potência consumida total atual é maior que 4200 W

e então desliga as cargas não prioritárias. Conforme o valor do estado de carga (SoC) do BB será ativada a utilização de energia solar FV. Para o requisito de conforto será levado em conta a temperatura necessária no ambiente e a quantidade de lâmpadas que devem ser ligadas.

Figura 47 – Algoritmo II - Modo de operação 2



Fonte: O autor

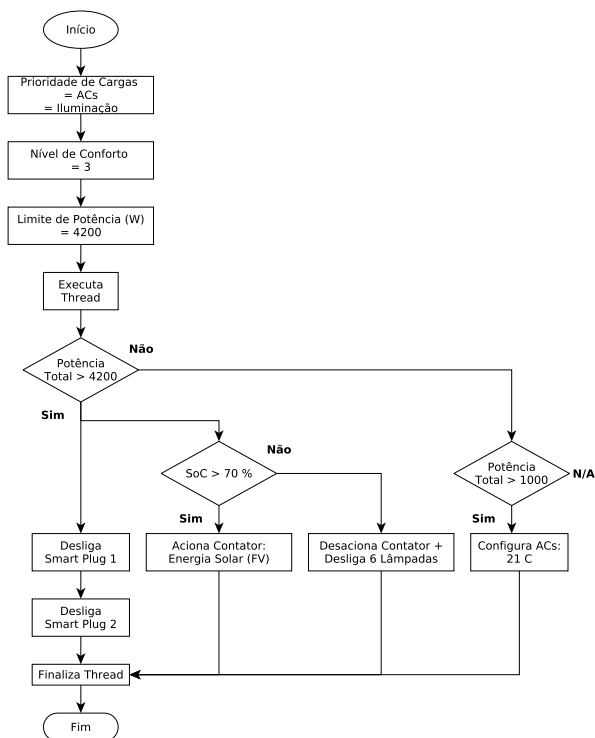
Para validar o Algoritmo II, foi criado um modelo RP para o mesmo. Na Figura 49 é apresentado esse modelo RP. A ferramenta TINA calculou o grafo alcançabilidade e as respectivas marcações, mostrados na Tabela 9, e forneceu os seguintes resultados de análise para a RP: limitada, viva e reversível. Os resultados de avaliação do Algoritmo II são apresentados na Seção 5.4.3.

4.8.3 Algoritmo III - Condições do Ambiente + Energias Renováveis

O terceiro algoritmo proposto é a combinação das características do Algoritmo I + Algoritmo II, pois considera as condições ambientais da CI como parâmetros para a tomada de decisão pelo supervisor e inclui a integração da energia renovável.

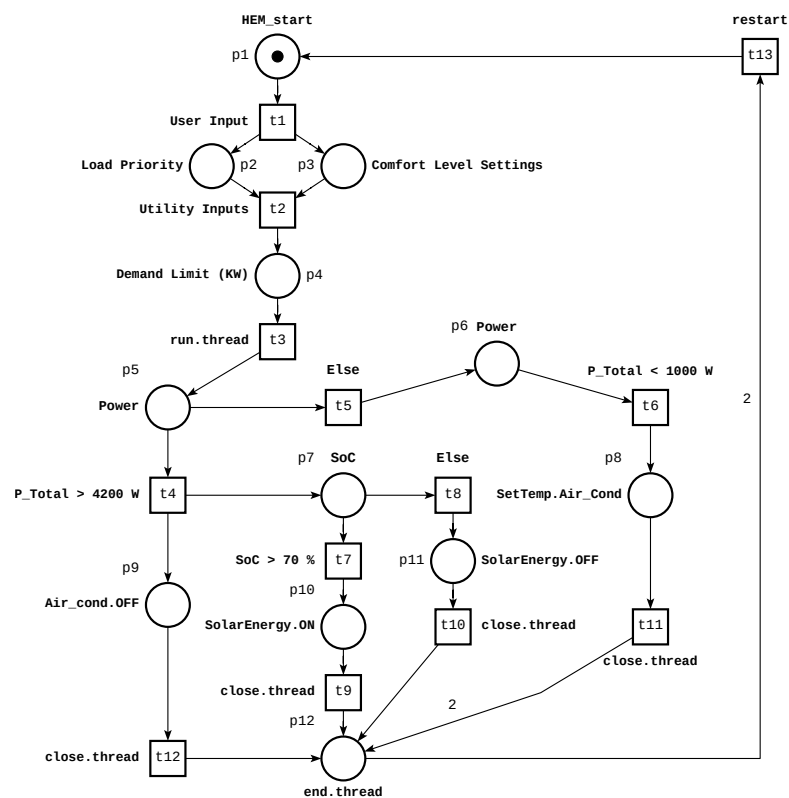
O Algoritmo III é mostrado na Figura 50. As informações previamente fornecidas pelo consumidor são: Definição das cargas prioritárias, o nível de conforto, o limite da demanda em kW e a duração da execução dessas tarefas. Após a inicialização da *Thread* é verificada a presença de pessoas no ambiente da CI. O algoritmo considera três casos:

Figura 48 – Algoritmo II - Modo de operação 3



Fonte: O autor

Figura 49 – Modelo RP do Algoritmo II



Fonte: O autor

Tabela 9 – Marcações e grafo de alcançabilidade da RP do Algoritmo II

Marcações (estados): 14	Eventos (transições): 20
0 : p1	0 → t1/1
1 : p2 p3	1 → t2/2
2 : p4	2 → t3/3
3 : p5	3 → t4/4, t5/5
4 : p7 p9	4 → t12/6, t7/7, t8/8
5 : p6	5 → t6/9
6 : p12 p7	6 → t7/10, t8/11
7 : p10 p9	7 → t12/10, t9/12
8 : p11 p9	8 → t10/12, t12/11
9 : p8	9 → t11/13
10 : p10 p12	10 → t9/13
11 : p11 p12	11 → t10/13
12 : p12 p9	12 → t12/13
13 : p12*2	13 → t13/0

Fonte: O Autor

- Presença de pessoas no ambiente da CI: O ambiente da CI entrará em modo *ON*. Isto significa que todas as lâmpadas e os ACs serão ligados.
- Não há pessoas no ambiente da CI: O ambiente da CI entrará em modo *Standby*. Isto significa que todas as lâmpadas e os ACs serão desligados.
- Presença de pessoas no ambiente da CI e o consumo está acima dos 2800 W pré-estabelecido: O ambiente da CI entrará em modo *OP* (*Operation*). O sistema supervisorio deverá determinar qual a melhor decisão para diminuir o consumo de energia, manter as cargas prioritárias funcionando e garantir o conforto do consumidor.

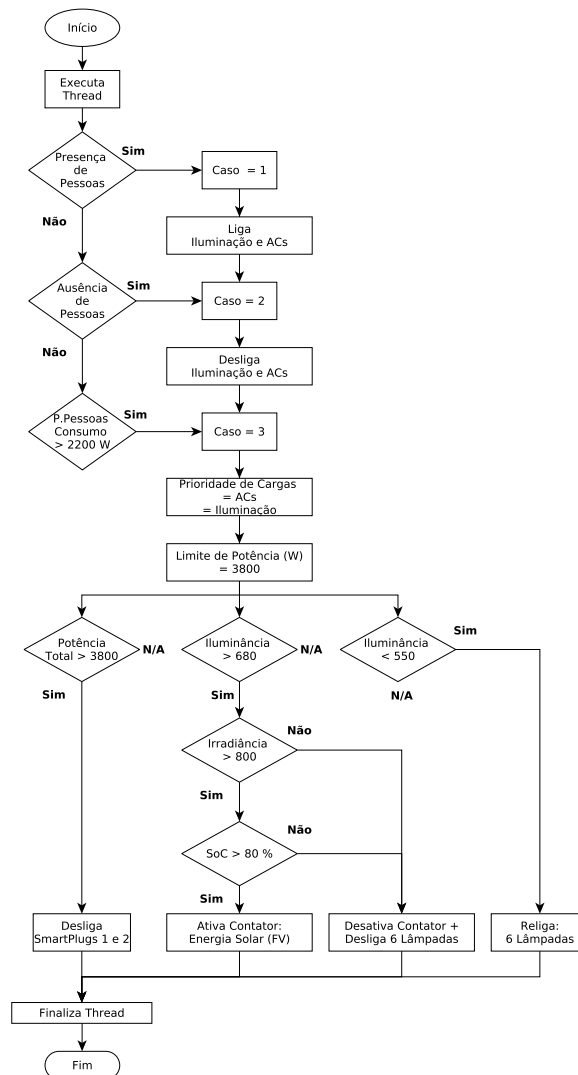
Com o objetivo de validar o Algoritmo III, foi criado um modelo RP para o mesmo. Para o modelo RP mostrado na Figura 51, a ferramenta TINA calculou o grafo alcançabilidade e as respectivas marcações, mostrados na Tabela 10, e forneceu os seguintes resultados de análise para a RP: limitada, viva e reversível. Os resultados de avaliação do Algoritmo III são apresentados na Seção 5.4.6.

4.9 Análise da Rede de Comunicação

4.9.1 Monitoramento com *Zabbix*

A arquitetura e a flexibilidade dos módulos possibilitam que a ferramenta *Zabbix* seja utilizada para o monitoramento convencional de redes de comunicação. A ferramenta oferece uma interface totalmente *Web* para administração e exibição de dados. Os alertas do sistema de monitoramento podem ser configurados para utilizar vários métodos de comunicação, como SMS, e-mail e abertura de chamados em sistemas de *helpdesk*. Esta

Figura 50 – Algoritmo III - Condições do Ambiente + Energias Renováveis



Fonte: O autor

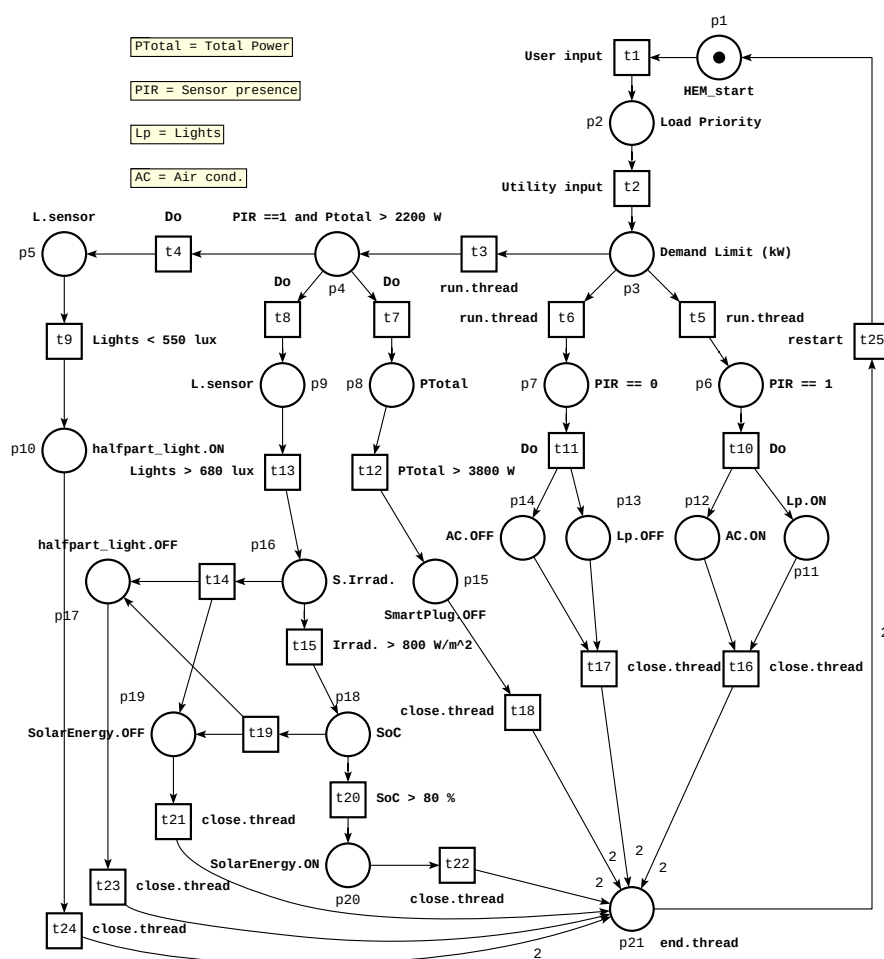
ferramenta auxiliou no trabalho de análise dos dados de comunicação e validou o envio de pacotes ICMP do supervisor Ayla.

A topologia da HAN instalada no LPE é mostrada na Figura 52. Este mapa foi desenvolvido no Zabbix.

4.9.2 Análise de pacotes de dados e tempo de resposta

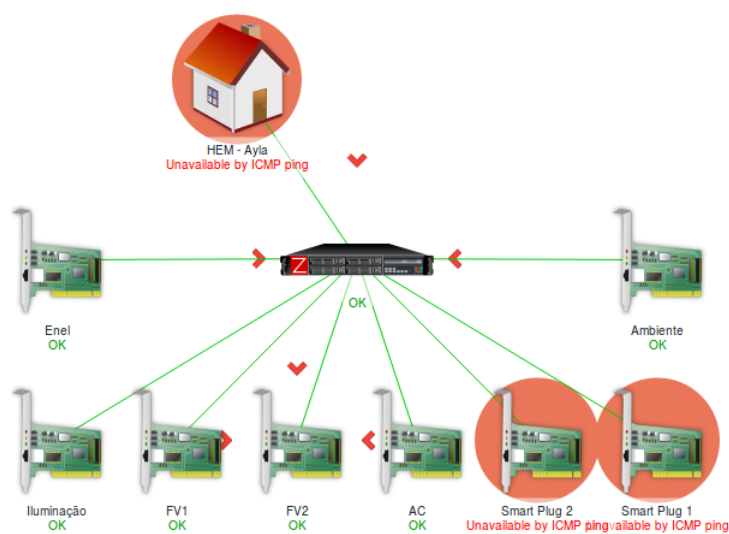
No trabalho de [Ahmed, Kang e Kim \(2015\)](#), foi realizada uma simulação no *OPNET Modeler* usando três tecnologias diferentes de topologias de redes: Ethernet, WiFi e Zigbee. O Zigbee apresentou um maior tempo de resposta na simulação. Na prática a comunicação sem fio depende de vários fatores como interferência e obstáculos. A HAN proposta neste trabalho também possui um dispositivo de acesso sem fio instalado a uma distância, aproximada, de 40 m.

Figura 51 – Modelo RP do Algoritmo III



Fonte: O autor

Figura 52 – Mapa da Rede IoT



Fonte: O autor

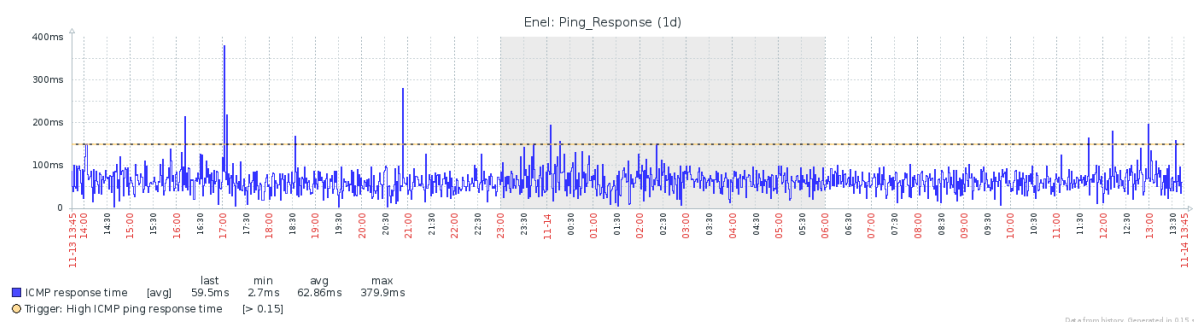
Tabela 10 – Marcações e grafo de alcançabilidade da RP do Algoritmo III

Marcações (estados): 20	Eventos (transições): 27
0 : p1	0 → t1/1
1 : p2	1 → t2/2
2 : p3	2 → t3/3, t5/4, t6/5
3 : p4	3 → t4/6, t7/7, t8/8
4 : p6	4 → t10/9
5 : p7	5 → t11/10
6 : p5	6 → t9/11
7 : p8	7 → t12/12
8 : p9	8 → t13/13
9 : p11 p12	9 → t16/14
10 : p13 p14	10 → t17/14
11 : p10	11 → t24/14
12 : p15	12 → t18/14
13 : p16	13 → t14/15, t15/16
14 : p21*2	14 → t25/0
15 : p17 p19	15 → t21/17, t23/18
16 : p18	16 → t19/15, t20/19
17 : p17 p21	17 → t23/14
18 : p19 p21	18 → t21/14
19 : p20	19 → t22/14

Fonte: O Autor

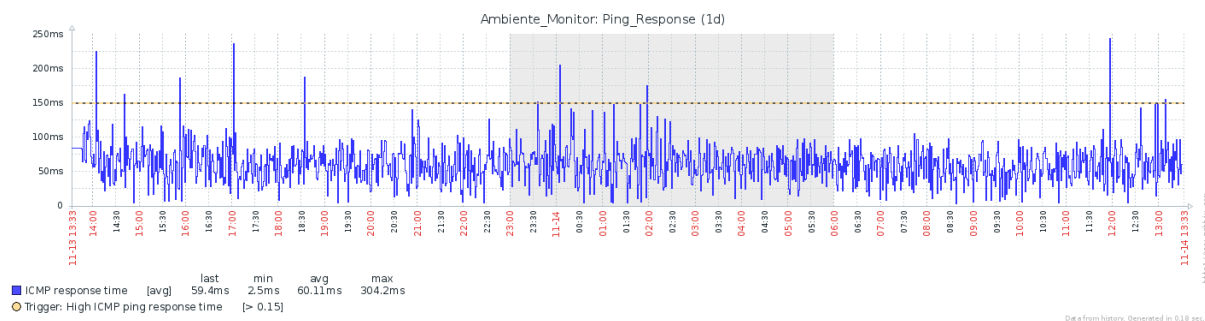
Nas Figuras 53, 54, 55 e 56 são mostrados os gráficos de envio de pacotes ICMP e verificação de perdas de pacotes, os picos correspondem às perdas ou demora na resposta do envio dos pacotes. Estes dados são resultados de um dia de ensaio no LPE.

Figura 53 – Tempo de envio de Pacotes ICMP - Monitoramento da Rede Elétrica



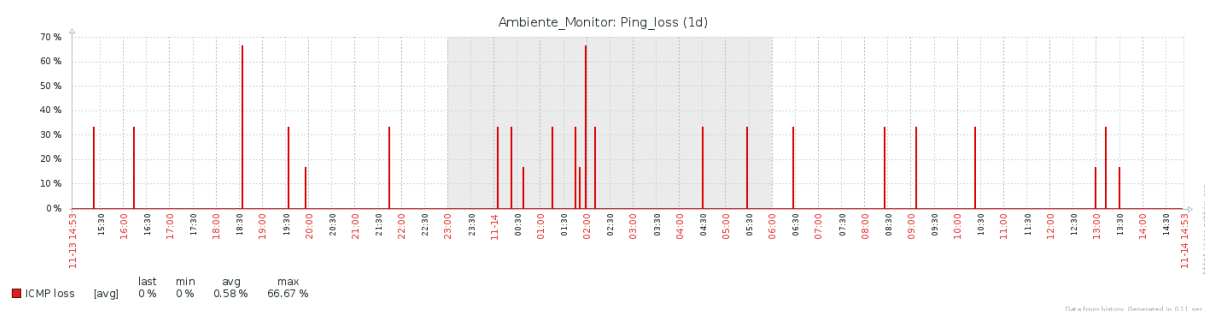
Fonte: O autor

Figura 54 – Tempo de envio de Pacotes ICMP - Monitoramento do Ambiente



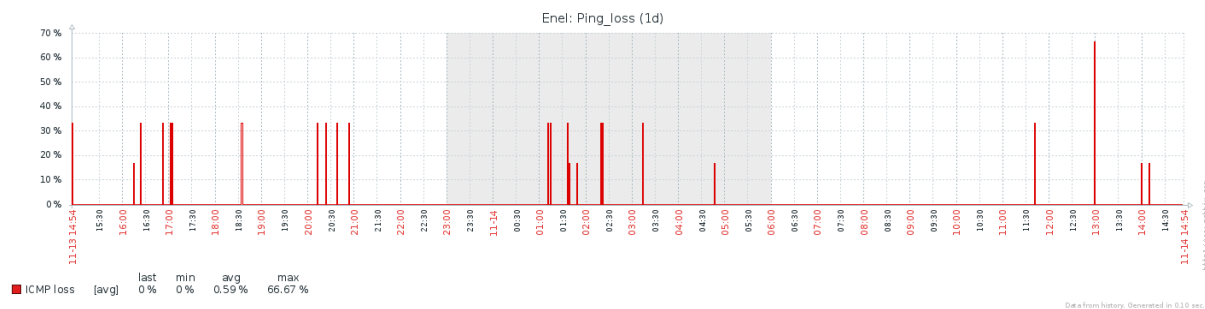
Fonte: O autor

Figura 55 – Perdas de Pacotes ICMP - Monitoramento do Ambiente



Fonte: O autor

Figura 56 – Perdas de Pacotes ICMP - Monitoramento da Rede Elétrica



Fonte: O autor

4.10 Comentários finais

Neste capítulo foram apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Foram apresentados os detalhes sobre: Sensores, atuadores, o procedimento de calibração dos sensores, os subsistemas de *hardware* montados para o monitoramento e controle da CI, a proposta da CI, o sistema supervisor (Ayla) desenvolvido para gerenciar a CI, a modelagem UML das funcionalidades do sistema supervisor, os algoritmos de operação automática da CI e sua modelagem em RP e a análise da rede de comunicação. No próximo capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos testes de validação do SGE desenvolvido neste trabalho.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos testes de validação do SGE desenvolvido neste trabalho para uma CI. A integração de todos os componentes de *hardware* e *software* da CI foi realizada no Laboratório de Processamento de Energia (LPE) do Departamento de Indústria no IFCE Campus Fortaleza.

5.1 Descrição inicial

Nos teste de validação do SGE no LPE, foi utilizado um analisador de energia para as medições elétricas de tensão, corrente, potência e energia nas instalações do laboratório. O objetivo foi comparar os valores medidos pelo *hardware* desenvolvido neste trabalho com os valores medidos por um equipamento comercial. Um computador do tipo *desktop* foi montado como servidor do ambiente. Neste computador ficou instalado o banco de dados das informações coletadas por todos os subsistemas do SGE, inclusive dados do analisador de energia. Além disso, este computador foi utilizado como monitor da infraestrutura de redes de comunicação utilizando *software Zabbix*. Assim, foi possível visualizar a comunicação entre as *interfaces* de rede, validando também a estrutura de comunicação do supervisor Ayla. Na Figura 57 é mostrado o servidor de testes no LPE.

Figura 57 – Computador para armazenamento e análise dos dados coletados pelo Ayla



Fonte: O autor

5.2 Componentes de Testes

Os subsistemas e componentes utilizados nos testes de validação foram: Um *laptop/tablet* com o supervisor Ayla instalado, dois *smart plugs*, duas fontes de energia solar FV, sendo uma das fontes responsável pela alimentação elétrica alternativa da iluminação principal do LPE e outra como opcional para alimentar um inversor no laboratório. Também foi utilizado um piranômetro para avaliação da irradiância solar, um monitor das variáveis físicas do ambiente, um atuador para comandar os ACs, um atuador para comandar a iluminação e um monitor da energia elétrica que funciona concomitantemente ao analisador de rede elétrica. Todos esses subsistemas e componentes são apresentados no Capítulo 4.

A rede elétrica do LPE era composta por um sistema trifásico e cada fase foi monitorada individualmente. Essas fases são representadas nos gráficos deste trabalho utilizando as seguintes cores: **U1 = Fase A**, **U2 = Fase B** e **U3 = Fase C**.

O subsistema de iluminação do ambiente do LPE era composto por doze lâmpadas de LED com potência nominal de 18 W (para 220 V e 60 Hz), montadas em seis calhas e conectadas à fase **U2**.

No LPE existiam dois aparelhos AC do tipo *inverter* com corrente nominal de 7,5 A. O AC1 era da marca Carrier e estava conectado à fase **U1**. O AC2 era da marca Midea e estava conectado à fase **U3**.

Os dois *smart plugs* foram ligados a duas tomadas do LPE cujas fases eram **U1** e **U3**. Para cada *smart plug* uma carga foi conectada ao dispositivo. No *SmartPlug1* foi conectado um computador do tipo *Desktop* e no *SmartPlug2* uma carga resistiva para simular um chuveiro elétrico residencial. A carga resistiva utilizada foi uma estufa com potência nominal de 1400 W que estava disponível no LPE. Na Tabela 11 são relacionados os equipamentos do LPE e suas respectivas fases de alimentação.

Tabela 11 – Equipamentos do LPE

Equipamento	Fase
AC1	U1
AC2	U3
SmartPlug1	U3
SmartPlug2	U1
Lâmpadas LED	U2
PC (Servidor)	U1
Tomadas bancada	U2

Fonte: O autor

O subsistema de monitoramento do ambiente foi utilizado para realizar a medição da temperatura, umidade, iluminância e presença de pessoas. Para isso, foram posicionados

quatro sensores de temperatura em pontos estratégicos do laboratório onde há maior possibilidade de variação de temperatura, dois sensores de luminosidade em cada lado do laboratório e dois sensores de presença também em cada divisão do laboratório.

O subsistema de geração de energia solar FV1 estava disponível no LPE e alimentava apenas um inversor *Off-Grid* de 1000 W (12 Vcc/220 Vca, 60 Hz). O seu uso foi definido como opcional. Já o subsistema FV2 foi interligado a um contator que fazia a comutação da rede elétrica normal para energia elétrica fornecida por FV2. A decisão de trocar a energia disponibilizada pela concessionária para o subsistema FV2 dependia do algoritmo utilizado no Ayla ou da atuação manual do usuário.

Quando o sistema do FV2 é acionado o subsistema de iluminação deixa de consumir da rede elétrica comum e passa a utilizar a energia elétrica gerada pelos painéis FV e/ou BB de FV2. No Anexo A, é mostrado o esquema elétrico do subsistema de iluminação do LPE.

O subsistema do piranômetro foi desenvolvido para fornecer uma referência da irradiância solar disponível durante o dia para auxiliar o supervisor Ayla a tomar decisões.

5.3 Cenário de Testes

Para padronizar os testes do SGE numa CI foram definidos os eletroeletrônicos que seriam ligados no LPE durante os testes. Para tanto, foram utilizados os componentes descritos na Seção 5.2 e, com mais detalhes, no Capítulo 4.

No verão, a temperatura ambiente média do LPE é de 25 °C, podendo chegar até 27 °C em dias mais quentes. Os testes foram realizados durante os meses de novembro e dezembro. Portanto, a iluminação natural proporcionada pelo Sol ao ambiente interno do LPE chegava a apresentar valores em torno de 600 a 800 lux no período da tarde. Portanto, para manter a iluminância adequada no laboratório, a norma NBR-5013 dispõe de dados para o trabalho em laboratórios com o padrão de 500 a 750 lux quando a realização de tarefas apresenta baixa refletância e contrastes bastante baixos ou o trabalho visual é crítico. Na Figura 58 é ilustrada uma representação em perspectiva do LPE.

5.4 Testes dos Algoritmos do SGE

5.4.1 Teste 1 - Sem gerenciamento

O primeiro teste de validação do SGE foi realizado sem o uso dos algoritmos de gerenciamento. Dessa forma, o SGE foi testado sem intervenção automática do Ayla. Assim, pretendia-se criar o pior cenário de demanda e consumo de energia no LPE. A realização

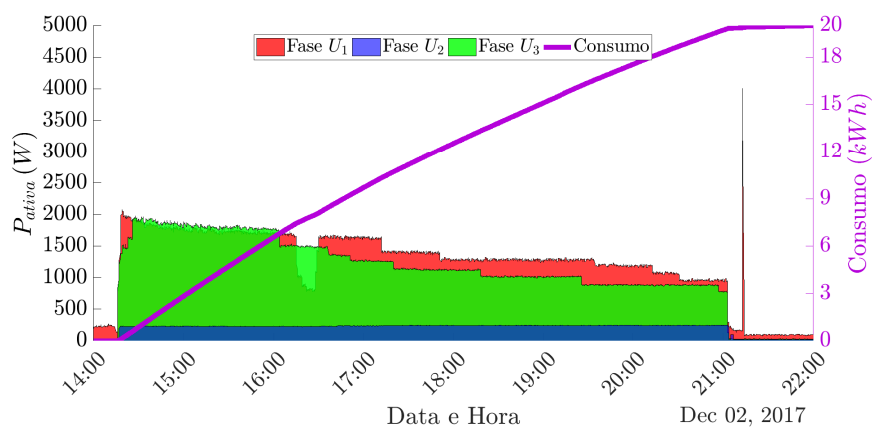
Figura 58 – Laboratório de Processamento de Energia - LPE



Fonte: O autor

dos testes ocorreram durante o intervalo de maior movimentação de pessoas no LPE, ou seja, das 14h às 21h. Na Figura 59 é mostrado o gráfico de potência ativa por fase.

Figura 59 – Potência ativa por fase - Sem gerenciamento

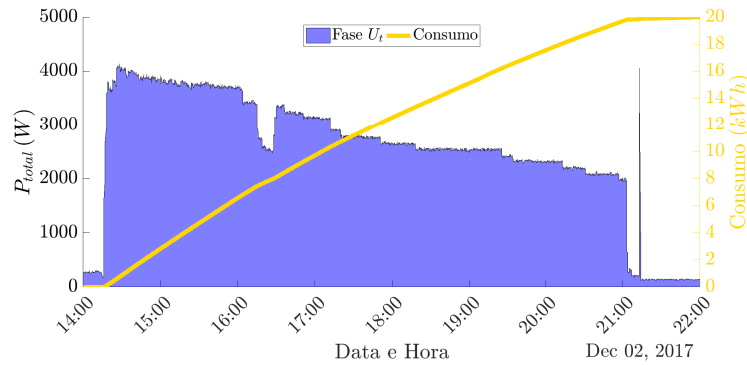


Fonte: O autor

De acordo com o gráfico mostrado na Figura 59, os ACs nas fases **U1** e **U3** tiveram o consumo maior entre 14h e 16h. O consumo foi reduzido à medida que a temperatura do ambiente diminuía. Essa é uma característica dos ACs do tipo *inverter*, pois a frequência de funcionamento do compressor varia de acordo com o nível da temperatura, evitando assim picos de energia. A fase **U2** do subsistema de iluminação permaneceu constante durante o período de teste.

Na Figura 60 é mostrada a potência trifásica com um valor de pico de 4000 W e consumo total de 20 kWh.

Figura 60 – Potência ativa trifásica - Sem gerenciamento



Fonte: O autor

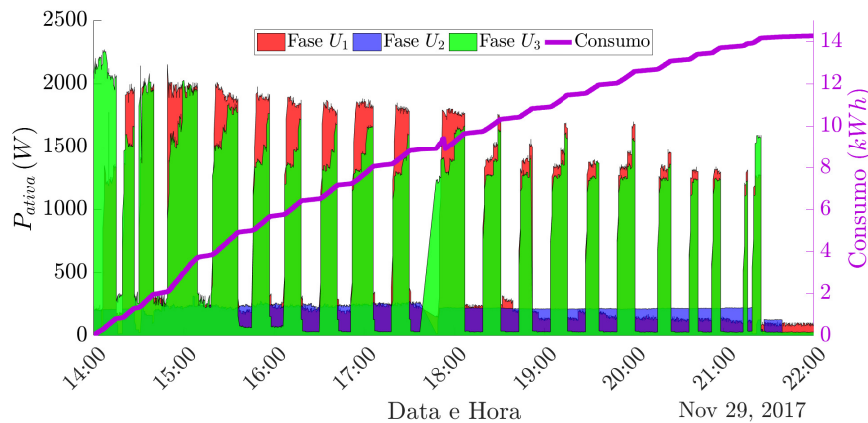
5.4.2 Teste 2 - Algoritmo I - Gerenciamento usando as condições do ambiente

O uso de um algoritmo utilizando as condições do ambiente foi proposto por [Ki et al. \(2016\)](#). Esse algoritmo com intervenção automática, leva em conta as seguintes variáveis de ambiente: Presença de pessoas, iluminância, estações do ano, temperatura e umidade.

Para a realidade da região Nordeste do Brasil, foi adotado o padrão de conforto descrito na NBR 16401-2 que leva em consideração fatores que afetam o conforto térmico. Desse modo, quatro sensores de temperatura do modelo DHT11 estão distribuídos em pontos estratégicos, visando maior proximidade com o usuário do laboratório.

Na Figura 61 é mostrado o gráfico de potência ativa por fase que possui vários intervalos em que os ACs tem seu funcionamento interrompido durante um período de tempo, isto ocorre devido aos sensores de temperatura alcançarem seus valores de mínimo e máximo para as condições de conforto térmico determinadas.

Figura 61 – P. Ativa - Gerenciamento usando condições do ambiente



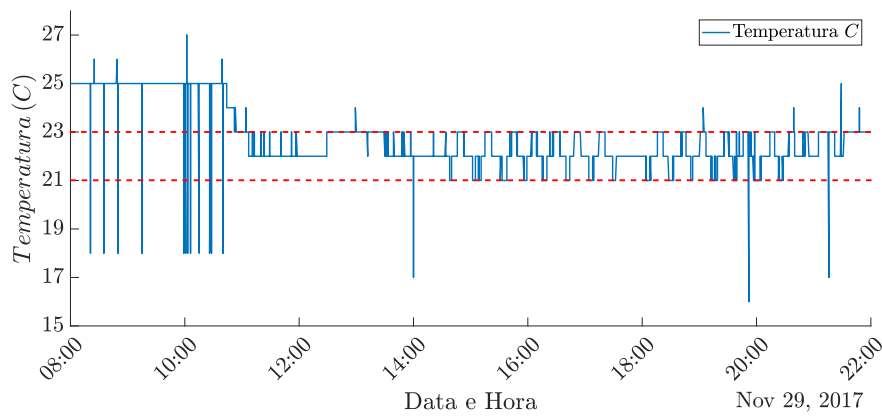
Fonte: O autor

A realização dos testes ocorreram durante o intervalo de maior movimentação de pessoas no LPE, ou seja, das 14h às 21h. Contudo, no gráfico, após às 18:00h é possível

visualizar a iluminação ligada na fase **U2**, mantendo o seu valor constante. Os valores de mínimo e máximo da luminosidade também foram delimitados para manter o conforto visual dos consumidores de 550 a 680 lux. Desse modo, com a leitura acima de 680 lux o algoritmo desliga seis lâmpadas ou para valores abaixo de 550 lux as lâmpadas são ligadas, mantendo assim o conforto visual e consequentemente a economia de energia.

O conforto térmico do consumidor é determinado de acordo com a temperatura dos sensores. Dessa forma, o Ayla por meio do algoritmo programado mantém a temperatura do laboratório entre 21°C e 23°C . Na Figura 62 é mostrado o gráfico de temperatura.

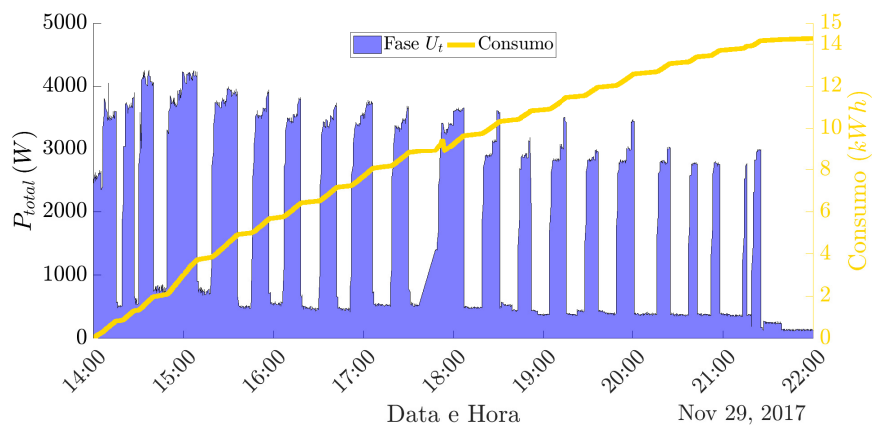
Figura 62 – Condições de Temperatura



Fonte: O autor

Na Figura 63 é mostrado de maneira mais clara o gráfico da potência total durante as horas de teste. Com esse algoritmo em funcionamento o consumo foi de aproximadamente 14 kWh . O pico da potência total foi aproximadamente 4100 W .

Figura 63 – P. Total - Gerenciamento usando condições do ambiente



Fonte: O autor

São considerados requisitos desse algoritmo:

- Verificar se há presença de usuários no LPE então;

- Verificar a iluminância se maior que 680 lux, então desliga seis lâmpadas;
- Verificar a iluminância se menor que 550 lux, então religa as seis lâmpadas;
- Verificar a temperatura se está em 21°C , desliga o AC;
- Verificar a temperatura se está em 23°C , religa o AC, atribuindo 18°C na memória do aparelho;
- Se não tiver usuários na sala, então ativa a *Thread* para desligar ACs e iluminação do LPE;

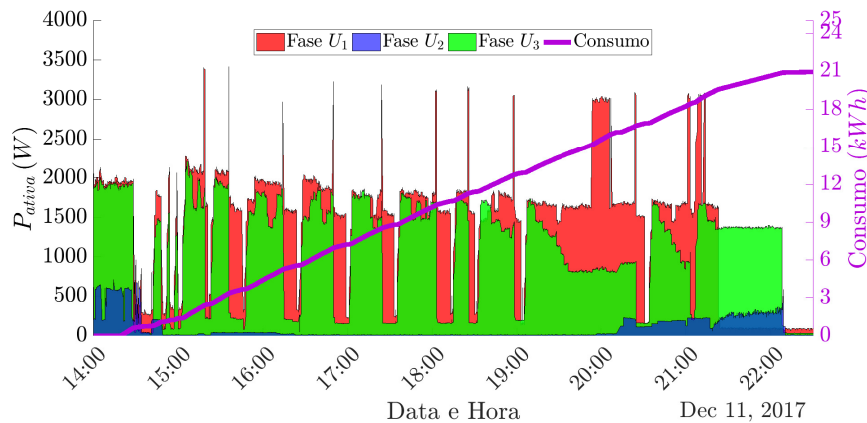
5.4.3 Teste 3 - Algoritmo II - Nível 1 - Gerenciamento integrado com energia renovável

Esse teste é baseado no algoritmo proposto por [Saha et al. \(2014\)](#) e sua principal característica é a utilização de um programa de resposta em demanda com a integração de energia renovável. A utilização da energia armazenada por meio do nível do SoC, a determinação dos níveis de conforto e o tempo de duração do programa de resposta em demanda (DR) também são fatores essenciais para implementação desse algoritmo.

A adaptação do algoritmo para o LPE foi realizada por meio da programação no Ayla, sendo determinado um limite de potência ativa. O objetivo é que as cargas mantenham um valor abaixo de 4200 W no algoritmo, levando em conta a prioridade de carga de acordo com o nível de conforto estabelecido.

A realização dos testes ocorreram durante o intervalo de maior movimentação de pessoas no LPE, ou seja, das 14h às 21h. Na Figura 64 é mostrado o gráfico de potência ativa por fase resultante das decisões do gerenciamento de energia e conforto.

Figura 64 – Gerenciamento com energia renovável



Fonte: O autor

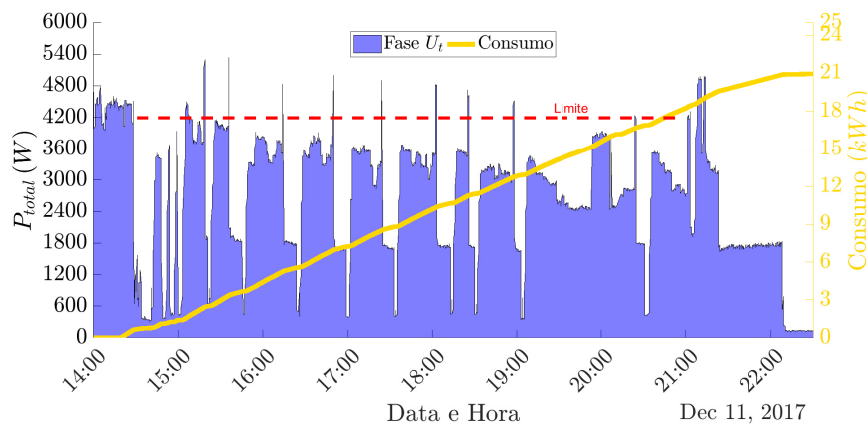
O nível 1 de conforto, seguindo o mesmo cenário padrão dos primeiros testes, possui a prioridade de uso de cargas e durante os testes uma carga resistiva, no caso, a estufa foi

ligada. Neste nível de conforto, os *smart plugs* 1 e 2 são prioridades e a iluminação deverá ser retirada da fonte de energia da concessionária e ligada na fonte solar FV2. Os ACs devem ser desligados caso ocorra um pico de energia. Com esses fatores será realizado o gerenciamento no Ayla.

No gráfico o primeiro teste de validação inicial com a ação de ligar a carga resistiva foi a partir das 15:20h, é possível observar que o sistema de iluminação já se encontra acionado à fonte de energia armazenada. É possível também visualizar o primeiro pico de energia que em seguida desligou os ACs nas fases **U1** e **U3**.

Os testes dos limites de consumo estabelecidos para as cargas foram executados das 15:20h às 21:00h, e após este horário o algoritmo foi retirado sendo possível visualizar o funcionamento dos eletroeletrônicos passando do limite estabelecido. Na Figura 65 é mostrado o gráfico da potência total de todas as fases do LPE sendo considerado como $FaseU_t$ no gráfico e o consumo durante o período de testes.

Figura 65 – Potência Total - Gerenciamento com energia renovável



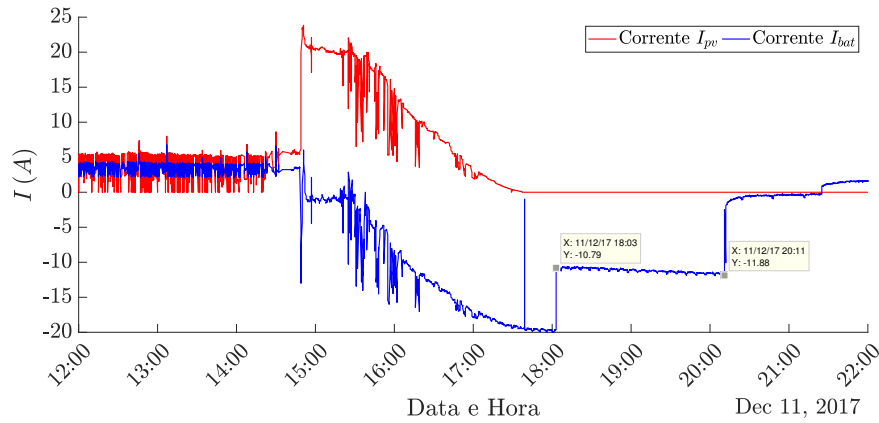
Fonte: O autor

Na Figura 66 é mostrada a utilização da energia solar FV2 no período da tarde. À proporção que a disponibilidade de corrente nos painéis diminui, a corrente fornecida pelo BB aumenta. Às 18:00h já não há mais disponibilidade de corrente nos painéis, então a carga permanece total sobre o BB do sistema FV2.

Um teste de desligamento de seis lâmpadas foi realizado às 18:03h quando o SoC atingiu um valor abaixo de 76 %. Esse valor de SoC foi inicialmente configurado como um pré-teste antes que alcançasse 60 %. O objetivo deste requisito é desligar algumas lâmpadas do LPE quando não houver energia armazenada disponível. Desta forma, também se otimiza o consumo da energia armazenada. Com esse algoritmo em funcionamento o consumo foi de aproximadamente 21 kWh. Na Figura 67 é mostrado o gráfico de SoC sendo utilizado para este algoritmo.

O valor do SoC do BB é calculado no sistema supervisor do SGE e quando este valor atinge a marca de 60 %, então o BB deixar de ser utilizado e o contator alterna

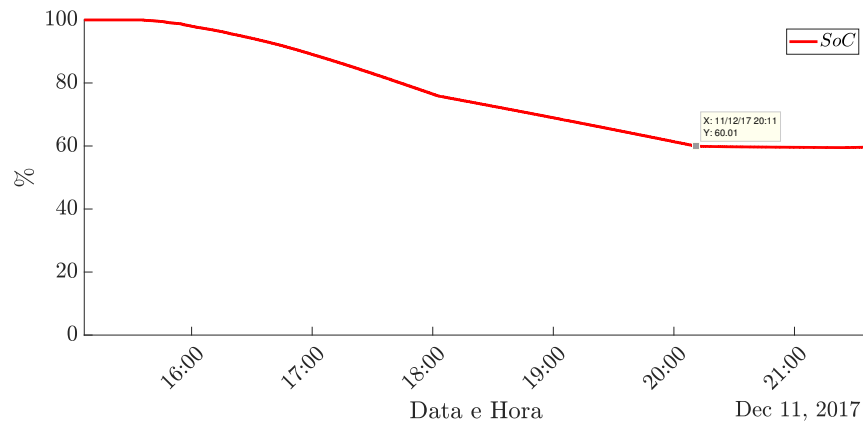
Figura 66 – Corrente fornecida pelo BB - Teste III



Fonte: O autor

a fonte de energia elétrica. A partir desse valor, a iluminação retorna para a fonte da concessionária. Na Figura 64 é possível visualizar a fase U2 em consumo pela fonte da concessionária a partir das 20:11h.

Figura 67 – SoC - Teste III



Fonte: O autor

São considerados requisitos desse algoritmo:

- Se limite maior igual a 4200 W e nível de conforto = 1;
- Prioriza as cargas dos *Smartplugs*;
- Alterna o sistema de iluminação da energia da Concessionária para FV2 se SoC maior que 60 %;
- Se SoC for menor que 60 %, então desliga três lâmpadas e o contator desativa, retornando a fonte de energia para a concessionária. Caso o consumo de energia elétrica esteja abaixo de 1000 W, então atribuir 23 °C no AC;
- Se o gasto ainda assim for excessivo desliga ACs.

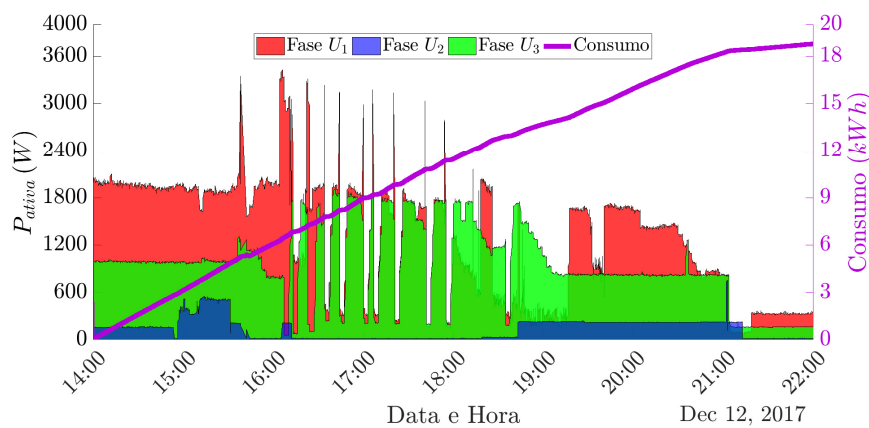
5.4.4 Teste 4 - Algoritmo II - Nível 2 - Gerenciamento integrado com energia renovável

O teste do nível 2 de conforto possui as mesmas características de funcionamento, cenário e componentes do nível 1.

A diferença empregada neste teste é a prioridade das cargas a serem utilizadas pelo consumidor. Nesse algoritmo foi definido um valor de 4200 W como limite de uso da energia elétrica, mantém a iluminação ligada e o *SmartPlug1* como prioridade. Nesse caso o AC deve ser desligado, juntamente com o *SmartPlug2*.

A realização dos testes ocorreram durante o intervalo de maior movimentação de pessoas no LPE, ou seja, das 14h às 21h. Na Figura 68 é mostrado o gráfico de potência ativa que corresponde ao nível 2.

Figura 68 – Potência Ativa Nível 2



Fonte: O autor

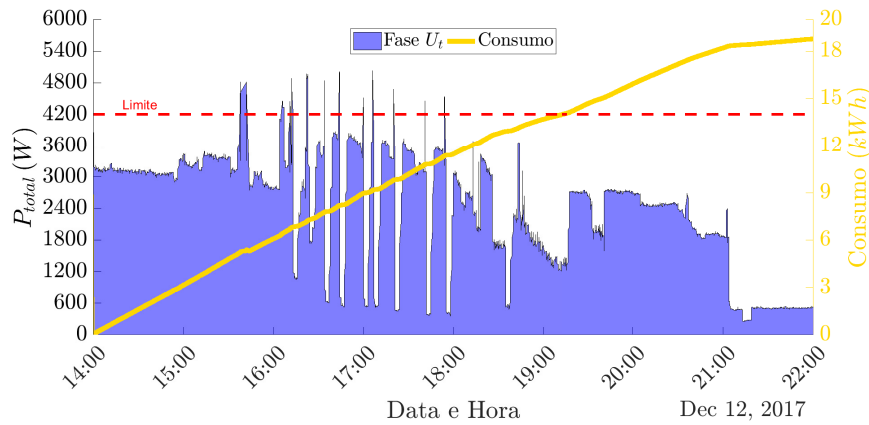
No teste, a primeira tentativa foi realizada às 15:36h e foi até às 17:41h. Na Figura 69 são mostrados os picos quando a carga é acionada por meio do *Smart Plug* de forma manual e em seguida desativada pelo Ayla. Consequentemente, os ACs eram desligados, permanecendo apenas a carga do *SmartPlug1* na fase U3.

A partir da primeira tentativa, o Ayla mudou a fonte de energia da iluminação para o subsistema FV2, acarretando assim, no mesmo processo de avaliação do estado de carga do banco de baterias realizado no Nível 1. Os requisitos permanecem os mesmos, contudo a mudança de prioridade de carga depende do nível de conforto configurado. Nesse teste, o SoC determinado para a decisão do supervisor foi 70 %. Com esse algoritmo em funcionamento, o consumo foi de aproximadamente 19 kWh.

A partir das 18:20h o AC da fase U1 diminuiu o seu consumo. Então foi possível ligar todas as cargas nos *smart plugs* e ACs.

São considerados requisitos desse algoritmo no Nível 2:

Figura 69 – Potência Total - Nível 2



Fonte: O autor

- Se limite for maior igual a 4200 W e Nível de conforto igual a 2;
- Prioriza a carga do *SmartPLug1* e Iluminação;
- Alterna o sistema de iluminação para FV2 se SoC maior que 70 %;
- Se SoC menor que 70 %, desliga seis lâmpadas e retorna a fonte da concessionária;
- Se o gasto ainda assim for excessivo desliga *SmartPlug2* e ACs.

5.4.5 Teste 5 - Algoritmo II - Nível 3 - Gerenciamento integrado com energia renovável

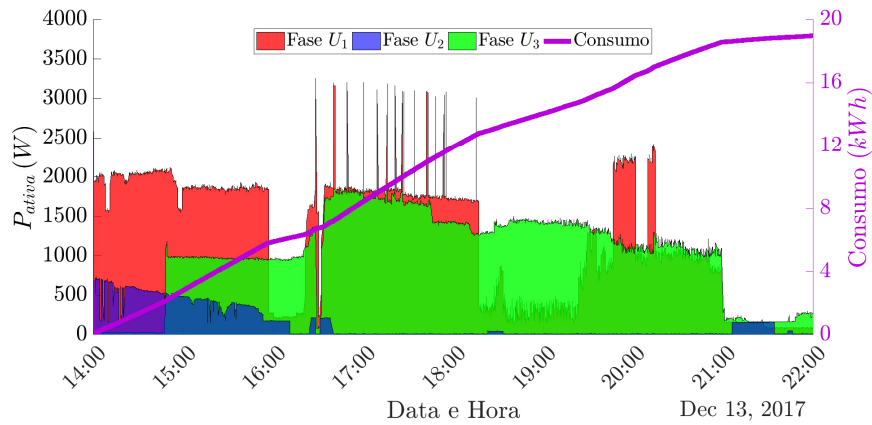
No teste nível 3, o conforto é máximo no LPE. Portanto, o consumo de energia é maior, pois prioriza o conforto térmico e visual. Assim, os ACs e iluminação são os principais componentes de funcionamento. O limite de consumo determinado no algoritmo foi de 4200 W.

Nesta situação os *Smart plugs* são desativados quando ocorre um pico na potência e ultrapassa o seu valor do limite pré-determinado pelo consumidor. Com esse algoritmo em funcionamento o consumo foi de aproximadamente 19 kWh.

A realização dos testes ocorreram durante o intervalo de maior movimentação de pessoas no LPE, ou seja, das 14h às 21h. Na Figura 70 é mostrado os gráficos de potência por fase e na Figura 71 é mostrado o gráfico de potência total referente ao nível de conforto 3.

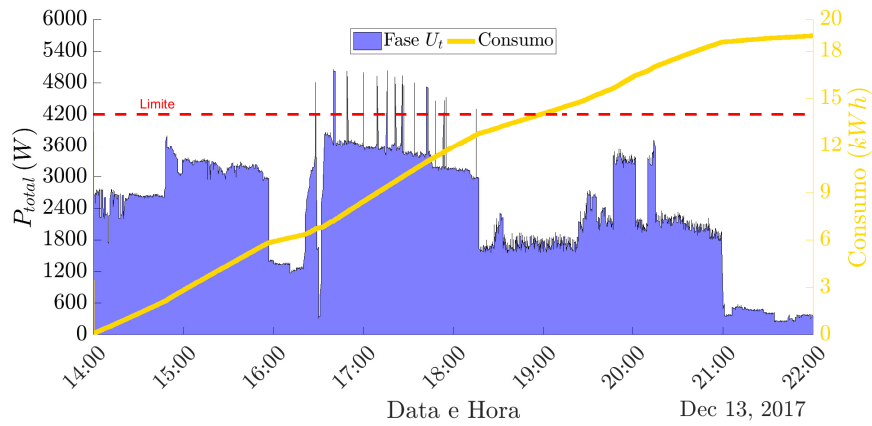
Os testes com os *Smart plugs* foram realizados das 16:38h às 18:15h, em todos os momentos o consumo nas fases **U1** e **U3** permaneceu constante não havendo o desligamento dos ACs. Na fase **U2** a iluminação passou a ser usada pelo subsistema FV2 até às 21:00h como mostra o gráfico na Figura 70.

Figura 70 – Potência Ativa - Nível 3



Fonte: O autor

Figura 71 – Potência Total - Nível 3



Fonte: O autor

Como pode ser observado, o AC na fase **U1** diminuiu o seu consumo após às 18:00h o que possibilitou o sistema ligar todos os seus componentes disponíveis para uso. O funcionamento de todos os componentes pode ser bem visualizado entre 20:00h e 21:00h na Figura 70.

São considerados requisitos desse algoritmo no Nível 3:

- Se limite maior ou igual a 4200 W e Nível de conforto igual a 3;
- Prioriza a carga do AC e Iluminação;
- Alterna o sistema de iluminação para FV2 se SoC maior que 70 %;
- Se SoC menor que 70 %, desliga seis lâmpadas e retorna a fonte da concessionária;
- Se o gasto ainda assim for excessivo, desliga *SmartPlug1* e *SmartPlug2*.

5.4.6 Teste 6 - Algoritmo III - Condições do ambiente + energia renovável

Esse algoritmo usa as condições do ambiente somado às características do gerenciamento integrado com energia renovável. Neste caso, o limite determinado para o consumo de energia é de 3800 W.

O algoritmo proposto verifica se há presença de consumidores no LPE. Caso tenha pessoas presente, então o modo “ON” será estabelecido, conseqüentemente a iluminação e os ACs serão ligados. Caso contrário, se não houver pessoas no laboratório, o Ayla automaticamente estabelecerá o modo “Standby” para o ambiente, assim desligará todas as lâmpadas e os ACs. Na Tabela 12 é mostrado os diferentes estados de operação deste algoritmo.

Tabela 12 – Casos do Algoritmo III

<i>Modos</i>	Estados
<i>Standby</i>	0
<i>ON</i>	1
<i>OP</i>	2

No modo *OP*, o sistema supervisor mantém o nível de conforto máximo, priorizando ACs e iluminação. Logo após, verifica se a iluminância está acima de 680 lux. Nesta etapa, também é verificado se a irradiância está acima de 800 W/m², caso esteja acima desse valor então os painéis FV2 passam a ser utilizados para iluminação, retirando o seu consumo da fonte da concessionária. Caso contrário se a irradiância for insuficiente, analisa-se o SoC do BB.

No caso do SoC com o valor acima de 80 %, então alterna para o uso da energia solar FV2. Caso contrário, o uso da energia deverá permanecer preferencialmente na fonte da concessionária e desligar seis lâmpadas.

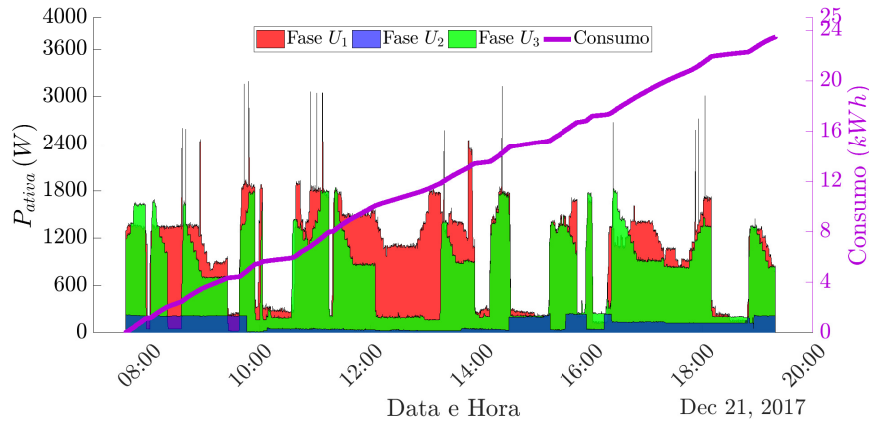
Se a iluminância estiver abaixo de 550 lux e caso a irradiância esteja acima de 800 W/m², a iluminação passará a ser alimentada pela fonte solar FV2. Caso semelhante à situação acima, porém o ambiente está em condições de baixa luminosidade, então o algoritmo religa as seis lâmpadas que foram desligadas no início da operação.

Esses estados podem ser visualizados de maneira mais clara no capítulo 4.8.3 no tópico de modelagem dos algoritmos em RP.

A média calculada de 11 horas de ensaio sem gerenciamento foi de aproximadamente 28,71 kWh com início às 8:00h e terminando às 19:30h. Sobretudo, nos testes com gerenciamento o consumo foi de aproximadamente 24 kWh, conforme pode ser visto no gráfico por fase na Figura 72.

Os testes de limites de consumo e prioridade de cargas foram realizados durante o dia, nos horários 8:37h, 8:40h, 9:40h, 11:02h, 11:08h, 13:02h, 13:51h, 14:20h, 16:24h,

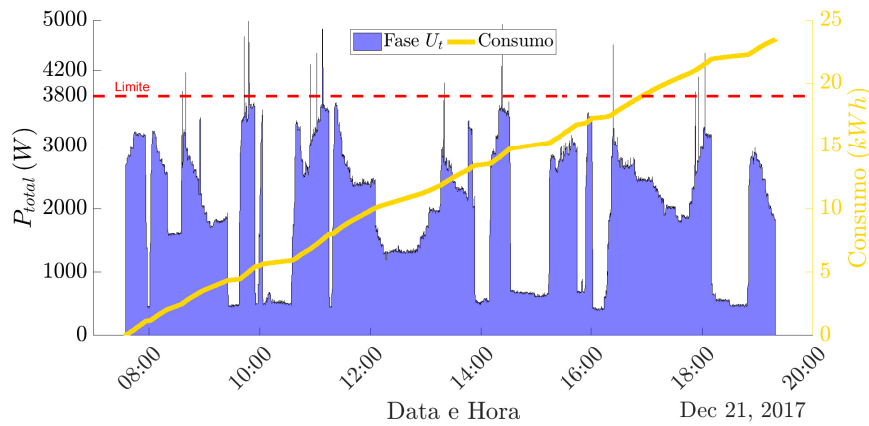
Figura 72 – Potência Ativa



Fonte: O autor

17:53h, 17:56h. Os *Smart plugs* são ligados juntamente com o AC e as lâmpadas. Caso o consumo das cargas seja maior que o limite estabelecido, então o *Smart plug* específico é desligado. Neste caso o conforto térmico e visual é prioridade. Na Figura 73 é possível visualizar a potência total ativa, o consumo e os picos de energia que ultrapassam o limite de consumo nos respectivos horários o que acarreta no desligamento da carga pelos *Smart plugs*.

Figura 73 – Potência Total

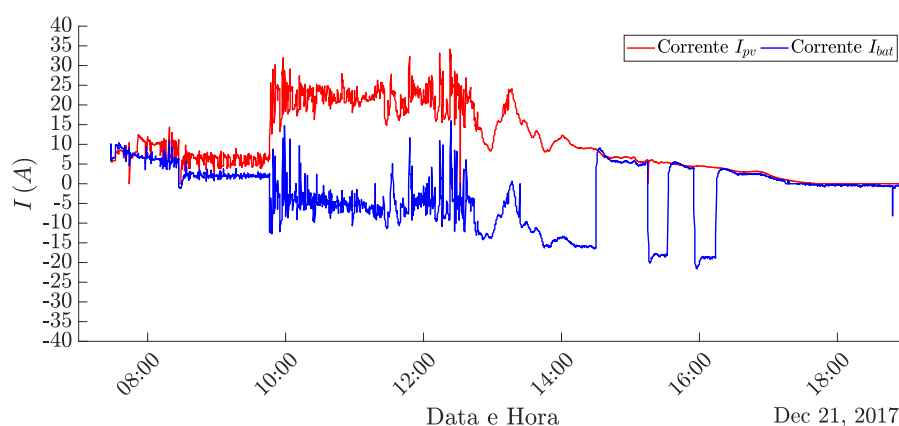


Fonte: O autor

Neste algoritmo uma das principais características, visando eficiência, é verificar a irradiância e auxiliar o supervisor a comutar a fonte de energia. Na Figura 74, gráfico de corrente do sistema FV2, é possível visualizar e acompanhar o comportamento em relação ao sistema de iluminação do laboratório na fase U2.

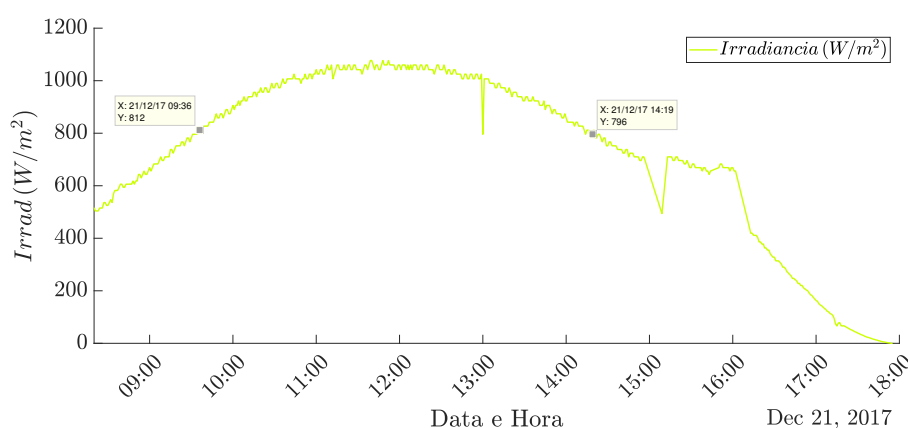
Como se pode visualizar na fase U2 da Figura 72 e na Figura 75, às 10:00h a irradiância está acima de 800 W/m^2 , então a fonte de energia é alternada para fonte solar FV, em seguida às 14:19h a irradiância fica abaixo do valor estabelecido, portanto retorna o consumo à fonte da concessionária.

Figura 74 – Corrente FV



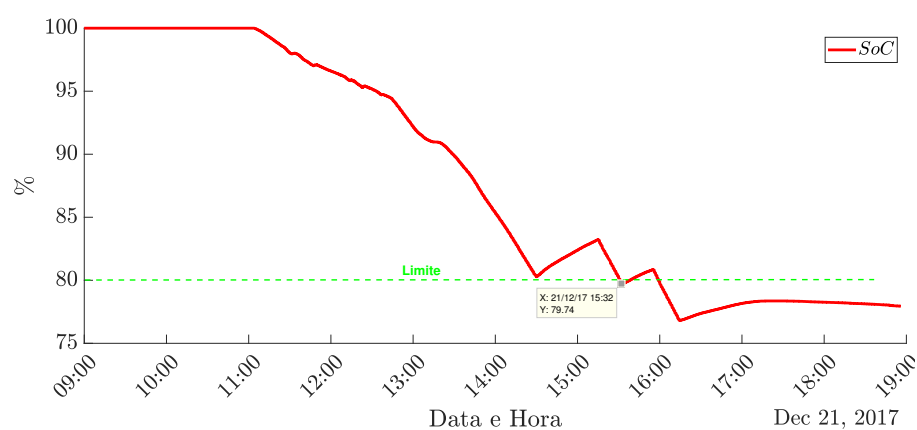
Fonte: O autor

Figura 75 – Irradiância



Fonte: O autor

Figura 76 – SoC



Fonte: O autor

Desse modo, às 15:32h com a irradiância local insuficiente, o SoC do BB ainda manteve um valor acima de 80 %, no entanto o sistema supervisorio atuou novamente e o valor do SoC como mostrado na Figura 76 atingiu o limite de uso da energia armazenada

pré-determinado na aplicação. O que acontece durante esta atuação do sistema supervisor é que nesta tomada de decisão o contator desativa, então o consumo de energia elétrica pela fonte de energia do subsistema FV retorna para a fonte da concessionária e em seguida ajusta a iluminação do LPE, mantendo-a parcialmente ligada.

No Ayla foi programado um indicador para certificação de desempenho da eficiência energética. Desse modo, utilizando a fórmula elaborada por Yigit e Acarkan (2016) para calcular a eficiência no período de um mês: $(\text{consumo real}/\text{consumo de referencia}) \times 100$. Se mantiver o uso constante do LPE durante 5 dias na semana com uma média de 2,61 kWh de consumo por hora, então em um mês a referência seria 574,20 kWh. O valor do consumo deste teste é 480,00 kWh em um mês.

$$E_{p,EP} = 100 \times \left(\frac{480,00}{574,20} \right) = 83,59 \quad (5.1)$$

Seguindo a tabela 4, o respectivo valor possui o selo “C”. Na Figura 77 é mostrado o indicador do Ayla com a respectiva classificação.

Figura 77 – Classificação de Desempenho de Eficiência



Fonte: O autor

São considerados requisitos desse algoritmo:

- Se limite maior igual a 3800 W;
- Prioriza a carga do AC e Iluminação;
- Alterna o sistema de iluminação da concessionária para FV2 se Irradiância for maior que 800 W/m²;
- Alterna o sistema de iluminação da concessionária para FV2 se SoC maior que 80 %;
- Se SoC menor que 80 %, desliga seis lâmpadas e retorna a fonte da concessionária;
- Se o gasto ainda assim for excessivo desliga *SmartPlug1* e *SmartPlug2*.
- Verifica a iluminância e se estiver abaixo do valor estabelecido, durante a noite então mantém as iluminação completamente ligada;
- Caso não tenha pessoas no laboratório então desliga lâmpadas e ACs modo *Standby*;
- Caso a sala volte a ser frequentada por usuários então o LPE entrará no modo *ON*;

5.5 Discussões dos resultados obtidos

Na Tabela 13 são mostrados os valores de consumo médio e total durante 8 e 12 horas de teste, bem como as características (consumo, conforto e eficiência) de cada teste por meio da utilização do respectivo algoritmo. Além disso são relacionados os utensílios domésticos disponíveis para a realização de cada teste.

Tabela 13 – Classificação dos resultados dos algoritmos testados

Testes	Algoritmos	Duração (h)	Consumo médio (kWh)	Consumo total (kWh)	Características	Equipamentos utilizados
I	Sem gerenciamento	8	8,02	20,04	N/A	AC1, AC2, 12 Lâmpadas LED 18 W, 1 PC e 1 Laptop
II	Condições do Ambiente	8	7,10	14,80	Consumo e Conforto	AC1, AC2, 12 Lâmpadas LED 18 W, 1 PC e 2 Laptops
III-Nv1	Energias Renováveis	8	8,76	22,09	Consumo e Eficiência	1 Estufa, AC1, AC2, 12 Lâmpadas LED 18 W, 1 PC e 1 Laptop
III-Nv2	Energias Renováveis	8	8,44	18,77	Consumo e Eficiência	1 Estufa, AC1, AC2, 12 Lâmpadas LED 18 W, 1 PC e 1 Laptop
III-Nv3	Energias Renováveis	8	8,27	18,93	Eficiência e Conforto	1 Estufa, AC1, AC2, 12 Lâmpadas LED 18 W, 1 PC e 1 Laptop
IV	Condições do ambiente + Energias renováveis	8	6,35	17,98	Consumo, Eficiência e Conforto	1 Estufa, AC1, AC2, 12 Lâmpadas LED 18 W, 1 PC e 1 Laptop
IV	Condições do Ambiente + Energias renováveis	12	9,32	23,47	Consumo, Eficiência e Conforto	1 Estufa, AC1, AC2, 12 Lâmpadas LED 18W, 1 PC e 1 Laptop

Fonte: O autor

O teste I sem gerenciamento foi realizado para que fosse disponibilizado os dados de consumo de energia sem nenhuma intervenção de algoritmo.

Durante o Teste II foi observado que o algoritmo prioriza o conforto térmico por meio do controle de nível de temperatura e o conforto visual por meio do controle de nível de iluminância. Consequentemente, o resultado de economia de energia durante o consumo foi o melhor quando comparado aos testes sem gerenciamento de energia. Este teste baseado no trabalho de [Ki et al. \(2016\)](#), que seu teste foi realizado em um instituto de energia coreana, durante o verão com temperatura ambiente entre 26°C e 28°C com umidades entre 20 % e 40 % e a referência da iluminância é 1000 lux. O critério de iluminância foi baseado no padrão da *American National Standard Institute* (ANSI).

Quando se trata do ambiente do teste II, as condições equivalentes ao trabalho foram realizadas no verão, proposto em um ambiente simulado de uma CI no LPE, com temperatura ambiente entre 24°C e 27°C com umidade em torno de 43 % e a referência da iluminância em em torno de 600 lux. O critério utilizado foi a NBR 16401-2. O resultado do consumo de energia pode ser visto na Tabela 13.

Para o Teste III foi proposto um nível de conforto no algoritmo e de acordo com o aumento do nível de conforto são priorizadas as cargas que realizam o controle do nível de temperatura para o conforto térmico e o conforto visual por meio do controle de iluminação da CI proposta no LPE. Os *Smart Plugs* são ligados às tomadas do LPE cada um com uma carga específica. Portanto, quando o sistema supervisor detecta que o consumo está acima do limite de potência, então é desligada a carga por meio do desacionamento do *Smart Plug* que possui um dispositivo atuador. Neste teste a energia armazenada é consumida até um limite de uso estabelecido no sistema supervisor. Sendo baseado no trabalho de Saha et al. (2014), que também utiliza cargas similares às utilizadas no LPE, com exceção do carro elétrico. No trabalho o teste é realizado em uma CI montada na universidade de Yildiz, possui as mesmas funcionalidades descritas do algoritmo acima. As condições de temperatura ambiente é em torno de 24 °C no verão e na proposta o algoritmo só funciona durante os horários de pico de energia no caso de 18:00h às 21:00h.

Na Tabela 13 é mostrado o consumo de cada nível de conforto estabelecido no algoritmo adaptado para utilização no LPE. Deve-se observar também que no primeiro nível de conforto o que se mantém ligado são as cargas ligadas aos *Smart Plugs* e no terceiro nível de conforto o que se mantém ligado são os aparelhos de ar condicionados e as lâmpadas do LPE. O maior consumo de energia foi no nível 1 de conforto por manter a carga resistiva (estufa) ligada por mais tempo.

O Teste IV foi baseado na junção dos algoritmos que leva em consideração as condições do ambiente adicionado ao algoritmo de integração da energia renovável. Os testes foram satisfatórios, foi mantido o conforto máximo do usuário no LPE de acordo com o nível de temperatura ambiente entre 23 °C e 24 °C, o conforto visual, foi mantido de acordo com a iluminância estipulada na NBR-5013 entre 500 e 750 lux. Um piranômetro foi adicionado ao ambiente de teste e de acordo com a irradiância disponível o sistema supervisor toma uma decisão em relação a troca da fonte de consumo de energia.

Neste teste, outros dois modos de operação foram adicionados ao algoritmo. Estes modos dependem dos sensores de presença espalhados no LPE. Para cada distúrbio nos sensores um modo de operação era executado no supervisor.

5.6 Comentários finais

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os principais resultados obtidos durante os testes de validação do SGE proposto e desenvolvido neste trabalho.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto e desenvolvido um SGE para uma CI, o qual possibilita a utilização eficiente de recurso solar FV e um sistema de armazenamento de energia baseado em banco de baterias. Para cada componente foi programada uma funcionalidade específica, sendo classificada como sensor ou atuador. Consequentemente, os subsistemas que possuem dispositivos sensores são, o monitoramento do ambiente, o monitoramento da rede elétrica, o piranômetro e o monitoramento do subsistema FV. Os subsistemas que possuem dispositivos atuadores são o *smart plug*, a iluminação e o ar condicionado. Estes constituem toda a parte de montagem física do sistema, incluindo o servidor e as interfaces de comunicação como roteador e os módulos WiFi.

Um sistema supervisório, denominado Ayla, foi desenvolvido para visualizar todas as informações dos sensores de forma centralizada na CI. Além disso, fornece suporte para o consumidor tomar uma ação manual nos atuadores por meio de botões programados, possibilita o teste de comunicação entre os componentes físicos e ainda pode manter as rotinas automáticas no gerenciamento de energia, visando a eficiência e o conforto térmico e visual. Os principais fatores motivadores para o desenvolvimento do Ayla são a oportunidade de manter o gerenciamento da energia mesmo em locais remotos e que não possua acesso à *Internet*, o suporte ao SGE mesmo com a geração de energia fotovoltaica não conectada à rede *Off-Grid*, a interface gráfica dedicada para o consumidor final residencial e a flexibilidade de integrar módulos como o uso de redes neurais artificiais sem a necessidade da compra de licenças de software .

Contudo, após a definição e montagem dos componentes, tornou-se necessário implementar rotinas automáticas ou algoritmos de gerenciamento da energia. Desse modo, na busca de auxiliar a implementação desses algoritmos na prática, houve a necessidade de propor esses modelos em Redes de Petri, visando o processamento de tarefas concorrentes, a visualização do funcionamento dos algoritmos em *Threads*, as condições de execução e *Deadlocks*.

O principal objetivo da implementação desses algoritmos foi fazer com que o sistema supervisório tome suas próprias decisões sem a intervenção humana. Dessa forma, nos testes foram implementados quatro modelos de algoritmos:

1. O primeiro teste foi realizado sem gerenciamento, visando apenas o funcionamento dos componentes do sistema.
2. O segundo teste com gerenciamento de energia levou em consideração as condições ambientais de uma CI.

3. O terceiro teste determinou um limite de consumo, prioridade do uso de cargas de acordo com o nível de conforto visual e térmico e a integração com recurso fotovoltaico.
4. O quarto e último teste apresentou o algoritmo que possui três modos de funcionamento que dependem da presença do usuário na sala e consumo de energia. Nesse algoritmo, as condições ambientais são adicionadas à prioridade do uso das cargas, limite de consumo, integração com recurso fotovoltaico e o piranômetro. Esses recursos, por sua vez, formam parâmetros essenciais para eficiência, ao mesmo tempo que se tenta manter o máximo conforto visual e térmico do ambiente.

Todos os testes tiveram resultados satisfatórios. Os resultados são baseados na tentativa de atingir o uso eficiente da energia elétrica, atendendo a necessidade do consumidor em relação ao conforto visual e térmico.

6.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Uma lista de sugestões para trabalhos futuros dando continuidade ao presente trabalho é apresentada a seguir.

- Implementar outros algoritmos de gerenciamento de energia, utilizando outras fontes de energia renovável;
- Realizar um estudo comparativo entre os diferentes protocolos de comunicação existentes;
- Desenvolver e aplicar um sistema de controle do nível de tensão em *Smart Plugs* visando manter o conforto do consumidor. Tem como propósito manter o eletrodoméstico ligado, porém funcionando com um nível de tensão mais baixo que o usual;
- Desenvolver e implementar no supervisor um algoritmo que de acordo com o nível do estado de carga da bateria que tome decisões no ambiente de acordo com o horário de pico de uso da energia elétrica;
- A partir das variáveis de condições do ambiente, implementar um modelo de previsão do comportamento do usuário para casa inteligente usando redes neurais artificiais;
- Seguindo na mesma linha de raciocínio deste trabalho, pode-se adicionar o foco em segurança da casa e o cuidado com a saúde das pessoas;
- Realizar a modelagem dos diferentes componentes que formam o sistema de gerenciamento de energia por meio da utilização de redes de petri coloridas;

- Um estudo mais aprofundado sobre conforto térmico, levando em consideração velocidade do ar, tipo de vestimenta e dinâmica do corpo. Consequentemente, resulta na implementação do cálculo de PMV e PPD que são conhecidos como o voto médio predito e a porcentagem de pessoas insatisfeitas. Na literatura há um estudo sobre este assunto bem definido para o conceito de conforto térmico;
- A proposta de um projeto a partir da aquisição dos dados disponíveis no trabalho para aplicar a computação em nuvem;
- A proposta de um estudo das topologias de redes no ambiente de uma CI, visando a segurança da informação. Dessa forma, algumas características dessas topologias podem ser estudadas como a descentralização das informações, incluindo a proposta de uma DMZ e outros meios alternativos como transformar o sistema em serviço, podendo ser acessado remotamente;
- A proposta de um estudo que envolva os modelos de selo de eficiência *online* no supervisor, sendo atualizado diariamente, fornecendo a classificação do uso eficiente da energia elétrica da CI;
- O desenvolvimento de um sistema de gerenciamento que seja conectado à rede elétrica (*On-Grid*), juntamente com a proposta de novos algoritmos;
- Desenvolver um supervisor para a plataforma móvel *smartphones*, implementando mais recursos com informações da conta de energia elétrica;
- O desenvolvimento de *Smart Plugs* que envie informações de consumo separadamente de cada eletrodoméstico de uma CI para o supervisor.

Referências

ABINEE. Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira. v. 1, p. 1–176, 2012.

AHMED, M.; AMIN, U.; AFTAB, S.; AHMED, Z. Integration of renewable energy resources in microgrid. **Energy and Power Engineering**, v. 7, p. 12–29, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4236/epe.2015.71002Integration>>.

AHMED, M. A.; KANG, Y. C.; KIM, Y.-C. Communication network architectures for smart-house with renewable energy resources. **Energies**, v. 8, p. 8716–8735, 2015. ISSN 1996-1073.

AL-ALI, A. R.; ABURUKBA, R. Role of internet of things in the smart grid technology. **Computer and Communications**, v. 3, p. 229–233, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4236/jcc.2015.35029Integration>>.

AL-FUGAHA, A.; GUIZANI, M.; MOHAMMADI, M.; MOHAMMEDALEDHARI; AYYASH, M. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 17, n. 30, p. 2347–2376, 2015.

ALECRIM, E. **Info Wester**. 2008. <<http://www.infowester.com/wifi.php#80211n>>. [Online; acessado 24-Julho-2016].

ANEEL. **Energia Solar**. 2005. <[www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)>. [Online; acessado 01-Agosto-2016].

ANEEL. **Programa de Eficiência Energética**. 2015. <<http://www.aneel.gov.br/programa-eficiencia-energetica>>. [Online; acessado 13-Outubro-2017].

ASHRAE. **Handbook of Fundamentals**. New York, USA: American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2005.

ASHTON, K. That internet of things thing. **RFiD Journal**, v. 22, n. 1, p. 97–114, 2009.

BACNET. **BACnet**. 2015. <<http://www.bacnet.org/>>. [Online; acessado 24-Julho-2016].

BALAKRISHNAN, M. Smart energy solutions for home area networks and grid-end applications. **freescall**, p. 67–73, 2011. Disponível em: <<http://freescall.com/power>>.

BANDEIRA, F. de P. M. Redes de energia elétrica inteligentes. p. 67–73, 2012. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/areas-da-conle/tema16/2012_7872.pdf>.

BANDYOPADHYAY, S.; SENGUPTA, M.; MAITI, S.; DUTTA, S. Role of middleware for internet of things : A study. **International Journal of Computer Science and Engineering Survey**, v. 2, n. 3, p. 94–105, 2011.

CARDOSO, J.; VALETTE, R. **Redes de Petri**. Florianópolis: UFSC, 1997. v. 1.

CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. **Introduction to Discrete Event Systems**. USA: Springer Science+Business Media, 2008. v. 2. ISBN 978-0-387-33332-8.

CGEE. Redes elétricas inteligentes: Contexto nacional. 2012. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/atividades/redirect/8050>.

CHAOUCHI, H. **The internet of Things : connecting objects to the web**. UK: WILEY, 2010. ISBN 978-1-84821-140-7.

CHEN, S.; LIU, T.; GAO, F.; JI, J.; XU, Z.; QIAN, B.; WU, H.; GUAN, X. Butler, not servant: A human-centric smart home energy management system. **IEEE**, v. 17, p. 27 – 33, 2017. ISSN 0163-6804.

CHOI, C. S.; LEE, J. I.; LEE, I. W. Complex home energy management system architecture and implementation for green home with built-in photovoltaic and motorized blinders. **International Conference on ICT Convergence**, p. 295–296, 2012. ISSN 21621233.

COSTA, E. M. M. **Redes de Petri e Aplicações aos Sistemas a Eventos Discretos**. Brasil: agBook, 2011.

CRUZ, E. **Redes Inteligentes Brasil**. 2018. <http://redesinteligentesbrasil.org.br/projetos-piloto-brasil.html>. [Online; acessado 24-Fevereiro-2018].

CRUZ, M. M. **Climaduino: Sistema Embarcado de Climatização para Edifícios Inteligentes**. Quixadá, CE: Universidade Federal do Ceará, 2013.

DIAZ, M. **Petri Nets - Fundamental Models, Verification and Applications**. London - UK: ISTE Ltd, 2009.

DOLEZILEK, D. J.; SCHWEITZER, S. Practical applications of smart grid technologies. **Journal of Reliable Power**, v. 2, p. 1–7, 2013.

EKANAYAKE, J.; LIYANAGE, K.; WU, J.; YOKOYAMA, A.; JENKINS, N. **Smart Grid Technology and Applications**. United Kingdom: JohnWiley & Sons Ltd, 2012. v. 1. ISBN 9780470974094.

ELMA, O.; SELAMOGULLARI, U. S. A home energy management algorithm with smart plug for maximized customer comfort. **IEEE**, v. 15, p. 1–3, 2015.

ELMA, O.; SELAMOGULLARI, U. S. A new home energy management algorithm with voltage control in a smart home environment. **Elsevier/energy**, v. 91, p. 720–731, 2015. ISSN 03605442.

ENEL. PE-020 - Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente (SIGFI). 2014.

EPE. **Balanco Energético Nacional**. 2017. http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-46/topico-82/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf. [Online; acessado 24-Fevereiro-2018].

EVANS, M.; NOBLE, J.; HOCHENBAUM, J. **Arduino in Action**. United States of America: Manning Publications Co., 2013. ISBN 9781617290244.

- GABBAR, H. A. **Smart Energy Grid Engineering**. 1. ed. London, United Kingdom: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-805343-0.
- GHASEMIEH, H.; HAVERKORT, B. R.; REMKE, M. R. J. A. Energy resilience modelling for smart houses. **Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks**, p. 275–286, 2015.
- GUEDES, G. T. A. **UML 2 - Uma abordagem prática**. São Paulo, SP: Novatec Editora Ltda, 2011.
- HALDER, A. **A Study of Petri Nets: Modeling, Analysis and Simulation**. 2006. Submitted in the requirement for the partial fulfillment of Dual Degree in Aerospace Engineering, West Bengal, INDIA.
- HAN, J.; CHOI, C.-S.; PARK, W.-K.; LEE, I.; KIM, S.-H. Smart home energy management system including renewable energy based on zigbee and plc. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 60, p. 198–202, 2014. ISSN 0098-3063.
- HAN, J.; CHOI, C. sic; LEE, I. More efficient home energy management system based on zigbee communication and infrared remote controls. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 57, p. 85–89, 2011. ISSN 0098-3063.
- HASNI, A.; SEHLI, A.; DRAOUI, B.; BASSOU, A.; AMIEUR, B. Estimating global solar radiation using artificial neural network and climate data in the south-western region of algeria. **Energy Procedia**, v. 18, p. 531–537, 2012. ISSN 1876-6102.
- HIDALGO, F. G.; MARTINEZ, R. F.; VIDAL, E. F. **Design of a Low-cost Sensor For Solar Irradiance**. 2014. <<http://oceanoptics.com/wp-content/uploads/Fernando-Guerra-Hidalgo-Sensors-Design.pdf>>. [This work has been supported by the project Prototype for distributed generation by means of Photovoltaic panels installed in the city of Antofagasta funded by the Universidad de Antofagasta].
- HOMIS. **Homis do Brasil**. 2018. <<https://www.homis.com.br/>>. [Online; acessado 09-Março-2018].
- JINI. **jini**. 2016. <<http://www.oracle.com/technetwork/articles/javase/jinievents-140780.html>>. [Online; acessado 24-Julho-2016].
- KAIWEN, C.; KUMAR, A.; XAVIER, N.; PANDA, S. K. An intelligent home appliance control-based on wsn for smart buildings. **IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies**, v. 16, p. 282–287, 2016.
- KAVI, K. M.; MOSHTAGHI, A.; CHEN, D. jyi. Modeling multithreaded applications using petri nets. **International Journal of Parallel Programming**, v. 30, p. 353–363, 2002. ISSN 1573-7640.
- KI, E. S.; KIM, J. S.; RYU, S. M.; CHOI, S. G. An algorithm for home energy management using environmental conditions. **IEEE**, p. 647–651, 2016.
- KIM, H.; LEE, S. K.; KIM, H.; KIM, H. Implementing home energy management system with UPnP and mobile applications. **Computer Communications**, v. 36, p. 51–62, 2012. ISSN 01403664.

- KNX. **knx**. 2016. <<http://www.knx.org/knx-en/knx/association/what-is-knx/index.php>>. [Online; acessado 24-Julho-2016].
- KOTHARI, D. P.; SINGH, P.; SINGH, M. Smart grid: Integration of power and information systems. **International Symposium on Computer Engineering**, p. 2–5, 2010.
- KUMAR, P.; PATI, U. C. Iot based monitoring and control of appliances for smart home. **IEEE**, v. 16, p. 1145–1150, 2016. ISSN 978-1-5090-0774-5.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. Brasil: Eletrobras, 2005.
- LIONEL, G. Service providers and the smart home. **SoftAtHome**, v. 1, p. 1–17, 2012.
- LONWORKS. **LonWorks**. 2016. <<http://www.echelon.com/applications/building-automation>>. [Online; acessado 24-Julho-2016].
- MARANHAO, G. N. A.; BRITO, A. U.; LEAL, A. M.; FONSECA, J. K. S.; MACEDO, W. N. Using ldr as sensing element for an external fuzzy controller applied in photovoltaic pumping systems with variable-speed drives. **Sensors**, v. 15, p. 24445–24457, 2015. ISSN 1424-8220.
- MESIROW, R. **The Future of Smart Devices and the Connected Home**. 2017. <<https://medium.com/iotforall/who-is-buying-into-iot>>. [Online; acessado em 19-Novembro-2017].
- MME. Smart grids. **Ministério de Minas e Energia**, v. 1, p. 5–229, 2010. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/acoes/Energia/Relatxrio_GT_Smart_Grid_Portaria_440-2010.pdf>.
- MOMOH, J. **Smart Grid: Fundamental of design and analysis**. Estados Unidos, USA: WILEY, 2012. ISBN 978-0-470-88939-8.
- MOURA. **Baterias Moura**. 2018. <<http://www.moura.com.br/>>. [Online; acessado 09-Março-2018].
- MURATA, T. Petri nets: Properties, analysis and applications. **IEEE**, v. 4, p. 541–580, 1989.
- NABIH, A. K.; GOMAA, M. M.; OSMAN, H. S.; ALY, G. M. Modeling , simulation , and control of smart homes using petri nets. **International Journal of Smart Home**, v. 5, p. 1–14, 2011. ISSN 1975-4094.
- NBR-5413. ABNT-Illuminância de interiores. In: _____. [S.l.: s.n.], 1992. v. 1, p. 3–13.
- NIST. Nist special publication 1108 nist framework and roadmap for smart grid interoperability standards. **Nist Special Publication**, 2010. Disponível em: <http://www.nist.gov/public_affairs/releases/upload/smartgrid_interoperability_final.pdf>.
- OLESON, E. **Powerhouse Dynamics. Are Your Thermostat Temperature Sensors in the Wrong Place?** 2017. <<https://powerhousedynamics.com/blog/thermostat-temperature-sensors-wrong-place>>. [Online; acessado 14-Outubro-2017].

- PAIOLA, C. E. G. O papel do supervisor no atual contexto tecnológico. **Intech** **132**, p. 6–18, 2011.
- PATIL, A.; HARIA, K.; PASHTE, P. Photodiode based pyranometer. **International Journal of Advances in Science Engineering and Technology**, v. 1, p. 29–33, 2013. ISSN 2321-9009.
- PELEGRI, M. A.; VALE, Z. A. Redes elétricas inteligentes: Diálogo setorial brasil-união europeia. **MCTI**, 2014. Disponível em: <<http://www.mcti.gov.br/documents/10179/35540/Redes+El?tricas+Inteligentes+-+Di?logos+Setoriais+Brasil-Uni?o+Europeia/1928a060-91ff-48e2-8479-ae590f0fd9a9>>.
- PEREIRA, G. A. de A.; WEISS, M. Redes inteligentes: principais desafios para o caso brasileiro. **Boletim de Conjuntura**, n. 12, p. 14–16, 2017.
- PIMVP, E. **Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance**. Toronto, Canadá: Efficiency Valuation Organization (Organização para a Avaliação de Eficiência), 2012.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia Fotovoltaica**. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESEB, 2014. v. 1.
- POMILIO, J. A. Eletrônica de potência para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. In: _____. [s.n.], 2012. v. 1, p. 1–17. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/CAP8.pdf>>.
- PROCEL. **PROCEL EDIFICA - Eficiência Energética nas Edificações**. 2006. <<http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMIDC46E0FFDBD124A0197D2587926254722LUMISADMIN1PTBRIE.htm>>. [Online; acessado 12-Outubro-2017].
- RIVERA, R.; ESPOSITO, A. S.; TEIXEIRA, I. **Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local**. 2013. <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2927>>. [Online; acessado 24-Fevereiro-2018].
- SAHA, A.; KUZLU, M.; KHAMPHANCHAI, W.; PIPATTANASOMPORN, M.; RAHMAN, S.; ELMA, O.; SELAMOGULLARI, U.; UZUNOGLU, M.; YAGCITEKIN, B. A home energy management algorithm in a smart house integrated with renewable energy. **IEEE**, p. 1–6, 2014.
- SANTOS, T. A. **Microgeração Fotovoltaica: Descrição e Desenvolvimento de um Projeto**. Fortaleza, CE: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, 2017.
- SETHURAMAN, M.; JAYANTHI, S. Low cost and high efficiency smart hems by using zigbee with mppt techniques. **International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engg**, v. 4, p. 46–49, 2014. Disponível em: <www.ijarcsse.com>.
- SHAIKH, P. H.; NOR, N. M.; NALLAGOWNDEN, P.; ELAMVAZUTHI, I. Intelligent optimized control system for energy and comfort management in efficient and sustainable buildings. **Procedia Technology**, v. 11, p. 99–106, 2013. ISSN 22120173.

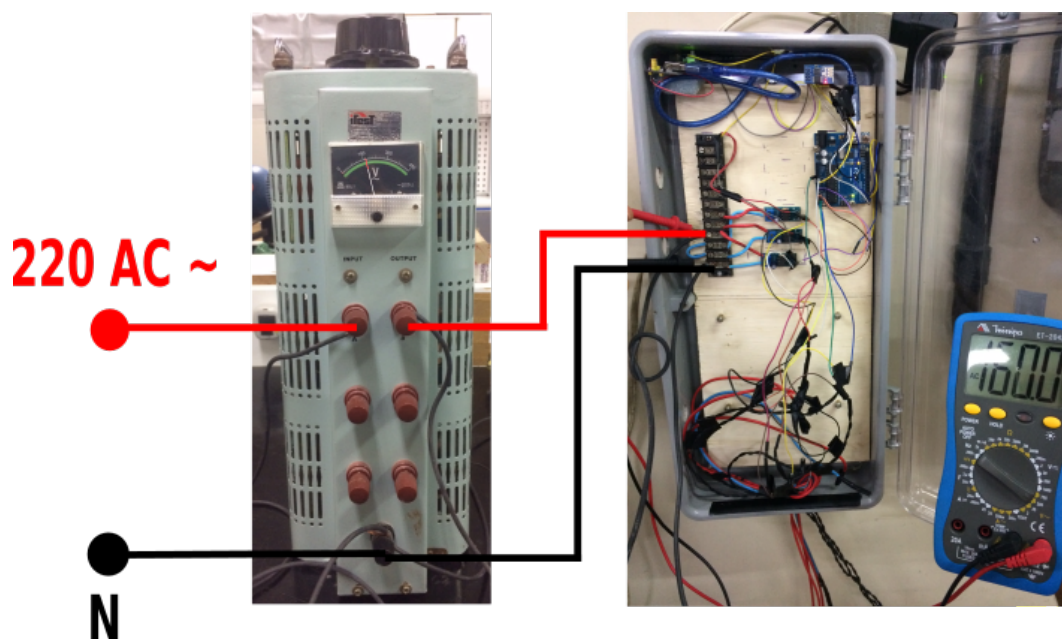
- SILVA, A. P. G. da; SALVADOR, M. O que são sistemas supervisórios? **Elipse RT 025.04**, p. 1–5, 2005.
- SURAJ, B.; BAJAJ, J.; ROJA, M. M. Technology, systems and implementation of a smart home automation system: A review. **INT.J.Computer Tecnology and Applications**, v. 5, p. 1690–1695, 2014. ISSN 2229-6093.
- SURYADEVARA, N. K.; MUKHOPADHYAY, S. C.; KELLY, S. D. T.; GILL, S. P. S. Wsn-based smart sensors and actuator for power management in intelligent buildings. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 20, p. 564–571, 2015. ISSN 10834435.
- SWART, A. J.; SCHOEMAN, R.; PIENAAR, C. Cost-effective energy monitoring of domestic off-grid pv systems. **Energy and Power Engineering**, v. 5, p. 182–188, 2013. ISSN 1949-243X. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10.4236/epe.2013.54B035>>.
- TUNG, H. Y.; TSANG, K. F.; TUNG, H. C.; RAKOCEVIC, V.; CHUI, K. T.; LEUNG, Y. W. A wifi-zigbee building area network design of high traffics ami for smart grid. **Smart Grid and Renewable Energy**, v. 3, p. 324–333, 2012. ISSN 2151481X.
- VEGA, A. M.; SANTAMARIA, F.; RIVAS, E. Modeling for home electric energy management: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 948–959, 2015. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.023>>.
- VIJAYAPRIYA, T.; KOTHARI, D. P. Smart grid: An overview. **Smart Grid and Renewable Energy**, v. 2, p. 305–311, 2011. ISSN 2151-481X. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10.4236/sgre.2011.24035>>.
- WALKER, A. **SOLAR ENERGY: Technologies and project process delivery for buildings**. USA: WILEY, 2013. v. 1. ISBN 978-1-118-13924-0.
- WANG, F.; HU, L.; ZHOU, J.; ZHAO, K. A survey from the perspective of evolutionary process in the internet of things. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 11, p. 1–9, 2015.
- WANG, Y.; DASGUPTA, P. Designing adaptive lighting control algorithms for smart buildings and homes. **IEEE**, v. 14, p. 279–284, 2014. ISSN 978-1-4799-3106-4.
- WELLS, Q. **SMART GRID HOME**. USA: CENGAGE Learning, 2013. v. 1. ISBN 978-1-111-31851-2.
- WOYTE, A.; RICHTER, M.; MOSER, D.; MAU, S.; REICH, N. H.; JAHN, U. Monitoring of photovoltaic systems: Good practices and systematic analyses. **28th European PV Solar Energy Conference and Exhibition**, v. 72, p. 24–30, 2013. ISSN 03787788.
- WU, Y.-C.; CHEN, M.-J.; CHANG, B.-S.; TSAI, M.-T. A low-cost web-based infrared remote control system for energy management of aggregated air conditioners. **Energy and Buildings**, v. 72, p. 24–30, 2014. ISSN 03787788.
- X10. X10. 2015. <<http://www.x10.com>>. [Online; acessado 24-Julho-2016].

- XU, G.; LIU, M.; LI, F.; ZHANG, F.; SHEN, W. User behavior prediction model for smart home using parallelized neural network algorithm. **IEEE**, v. 16, p. 221 – 226, 2016. ISSN 978-1-5090-1915-1.
- YIGIT, K.; ACARKAN, B. Assessment of energy performance certificate systems: a case study for residential buildings in turkey. **Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences**, v. 24, p. 4839–4848, 2016.
- YU, X.; CECATI, C.; DILLON, T.; SIMOES, M. G. The new frontier of smart grids. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 5, p. 49–63, 2011. ISSN 1932-4529.
- ZANETTI, S. S.; SOUSA, E. F.; CARVALHO, D. F. de; BERNARDO, S. Estimação da evapotranspiração de referência no estado do rio de janeiro usando de redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, p. 174–180, 2008. ISSN 1982-4351.
- ZIPPERER, A.; ALOISE-YOUNG, P. A.; SURYANARAYANAN, S.; ROCHE, R.; EARLE, L.; CHRISTENSEN, D.; BAULEO, P.; ZIMMERLE, D. Electric energy management in the smart home: Perspectives on enabling technologies and consumer behavior. **NREL**, v. 101, 2013. Disponível em: <www.nrel.gov/publications>.
- ÖZKAN, H. A.; AYBAR, A. A smart air conditioner in smart home. **IEEE**, v. 16, p. 1–6, 2016. ISSN 978-1-5090-2320-2.

Apêndices

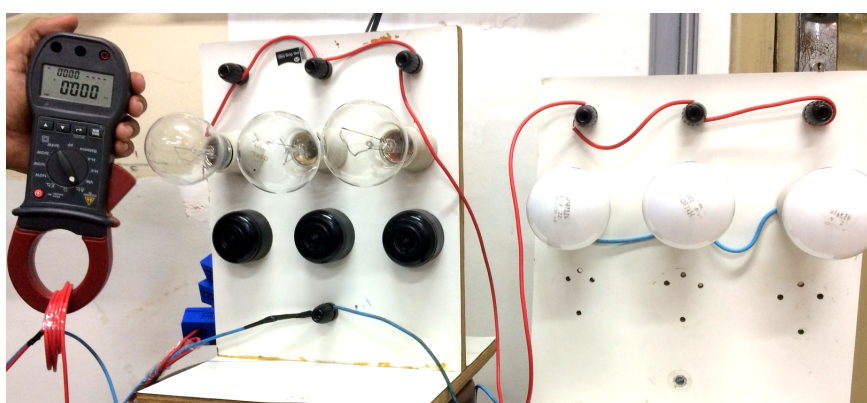
APÊNDICE A – Montagem dos Equipamentos de Calibração

Figura 78 – Calibração do sensor de tensão



Fonte: O autor

Figura 79 – Conjunto de cargas (lâmpadas)



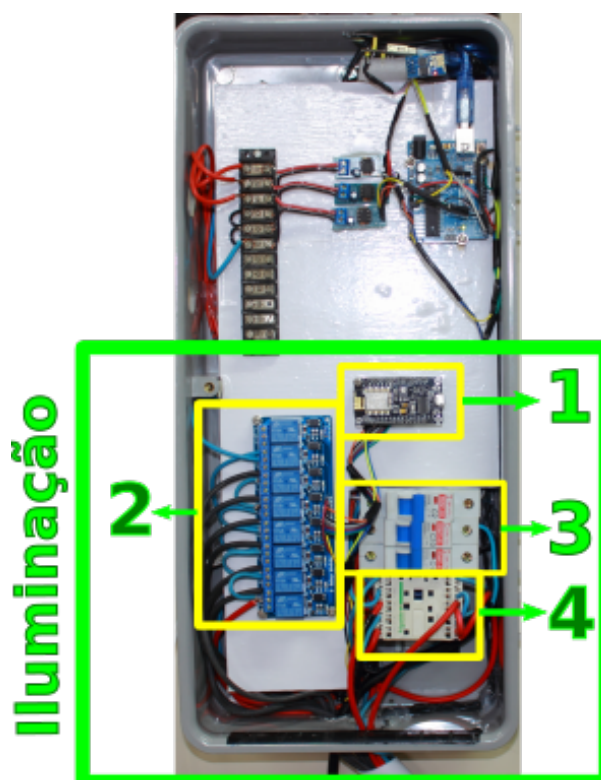
Fonte: O autor

APÊNDICE B – Subsistema de Iluminação

Na Figura 80 é mostrado a montagem do subsistema de iluminação. Os componentes utilizados são:

1. NodeMCU: Módulo WiFi utilizado na comunicação entre o sistema supervisor e o subsistema de iluminação;
2. Relés eletromagnéticos: dispositivos atuadores utilizados para ligar/desligar as lâmpadas. São acionados pelo módulo NodeMCU;
3. Disjuntores termomagnético: dispositivos utilizados para proteger os circuitos elétricos contra sobrecorrentes; e
4. Contator eletromagnético: dispositivo de manobra utilizado na comutação entre a fonte de alimentação da concessionária de energia e fonte solar FV.

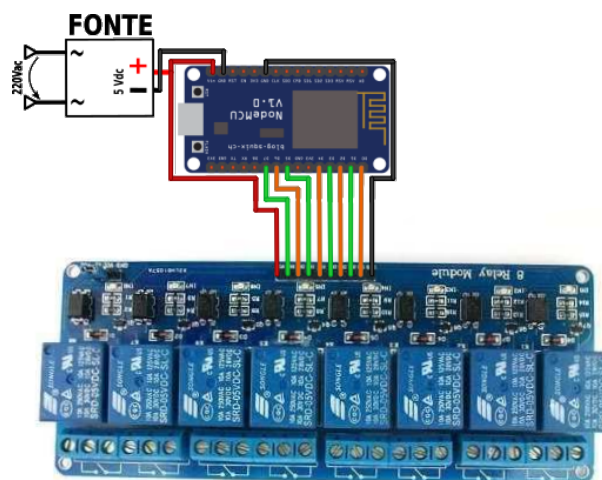
Figura 80 – Subsistema de iluminação



Fonte: O autor

Na Figura 81 é mostrada a conexão entre o módulo NodeMCU e o conjunto de relés eletromagnéticos.

Figura 81 – Conexão dos componentes - Iluminação

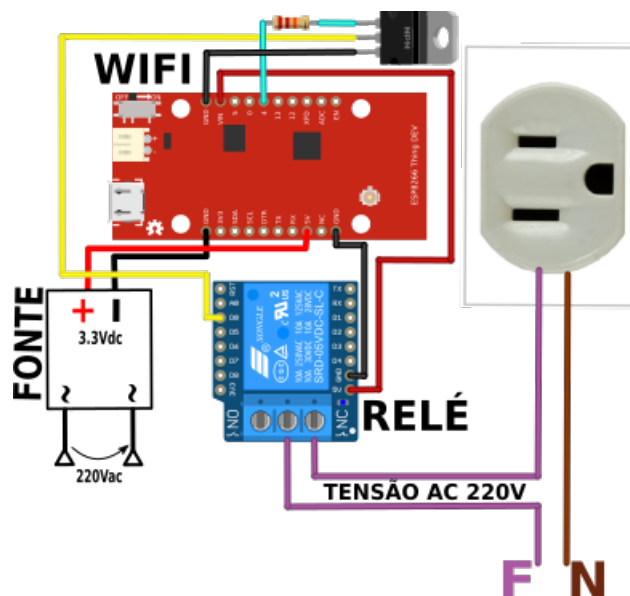


Fonte: O autor

APÊNDICE C – Subsistema *Smart Plug*

O subsistema *Smart Plug* utiliza comunicação sem fio padrão *IEEE 802.11g/n*. Na Figura 82 são mostradas as conexões entre os seus componentes.

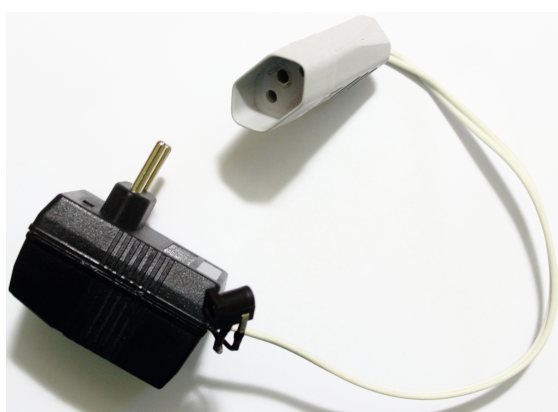
Figura 82 – Conexão dos componentes - *Smart Plug*



Fonte: O autor

Na Figura 83 é mostrado o resultado final do projeto do dispositivo.

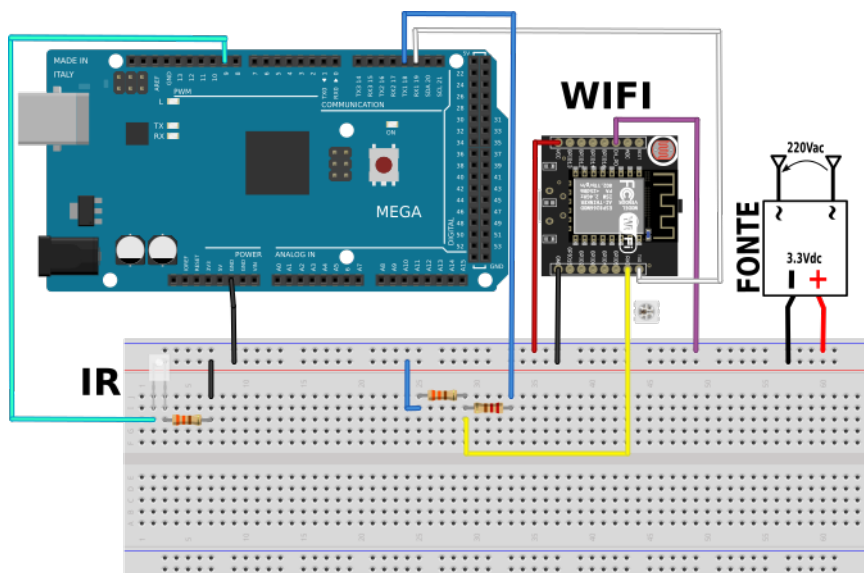
Figura 83 – *Smart Plug*



Fonte: O autor

APÊNDICE D – Subsistema de AC

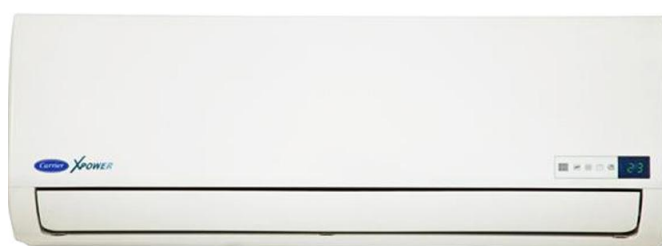
Figura 84 – Conexão dos componentes - Controle do AC



Fonte: O autor

Nas Figuras 85 e 86 são mostrados os AC utilizados na climatização do LPE.

Figura 85 – AC I



Fonte: O autor

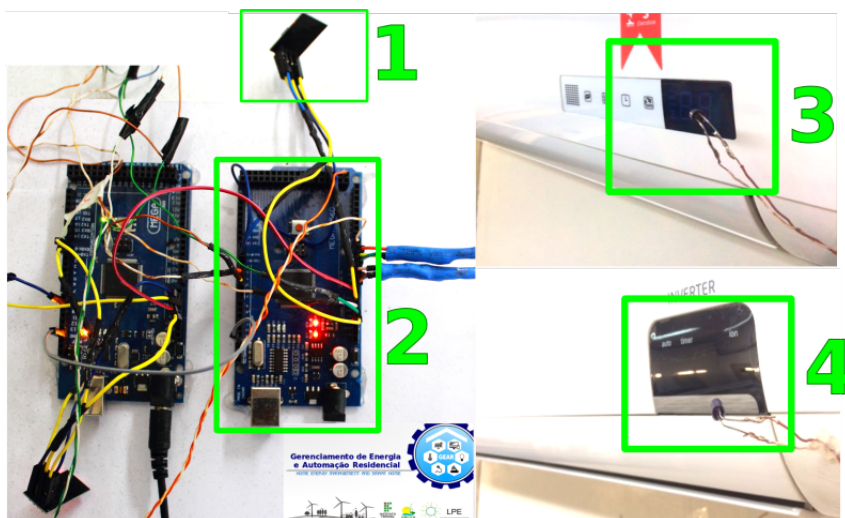
Figura 86 – AC II



Fonte: O autor

Na Figura 87 são mostrados os dispositivos de atuação IR dos AC.

Figura 87 – Microcontrolador e dispositivos de atuação IR

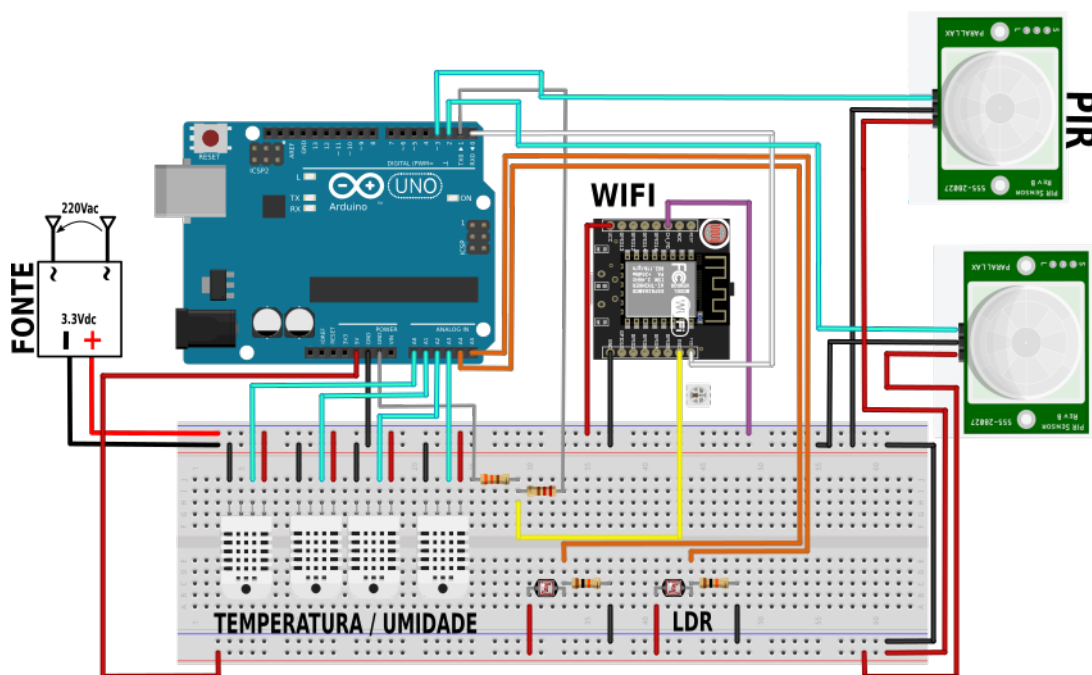


Fonte: O autor

1. ESP8266-01: Módulo WiFi utilizado na comunicação entre o sistema supervisor e o microcontrolador que controla os AC;
2. Arduíno Mega: Microcontrolador utilizado no processamento dos dados que são transmitidos e recebidos pelo módulo ESP8266-01;
3. Atuador IR utilizado no controle do AC I;
4. Atuador IR utilizado no controle do AC II.

APÊNDICE E – Subsistema de Monitoramento do Ambiente

Figura 88 – Conexão dos componentes - Monitoramento do ambiente



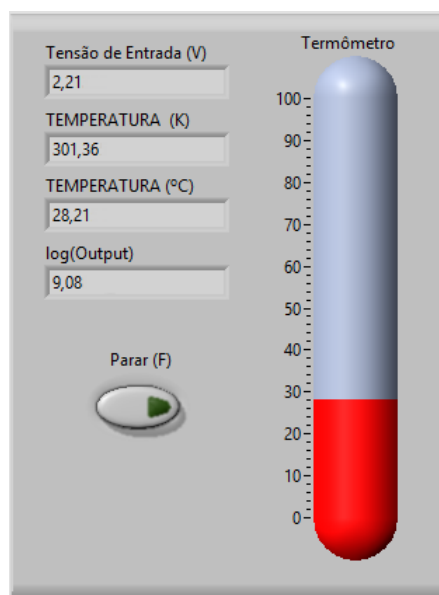
Fonte: O autor

Figura 89 – Módulo de aquisição de dados NI 6009



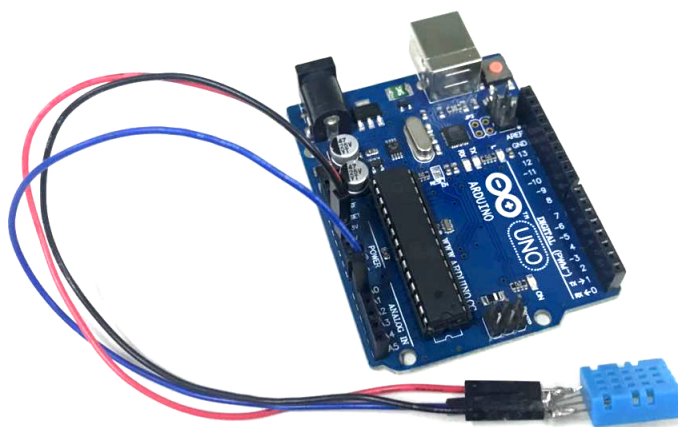
Fonte: O autor

Figura 90 – Tela do termômetro NTC no LabVIEW



Fonte: O autor

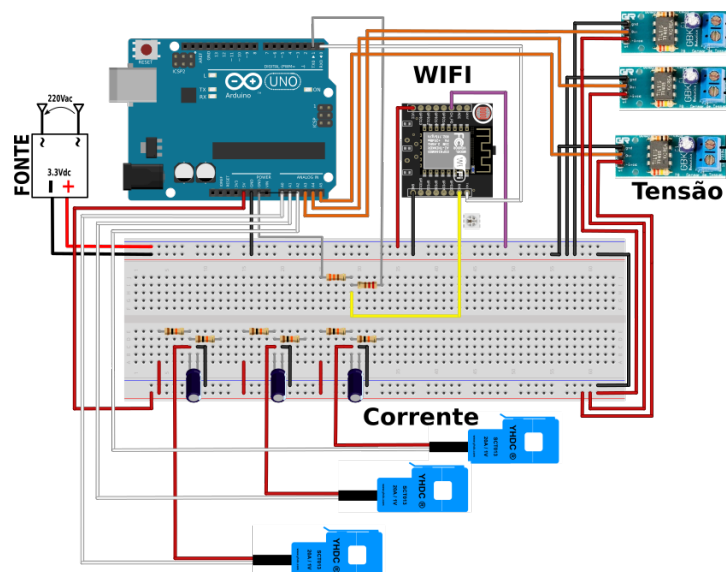
Figura 91 – Arduino com sensor DHT11



Fonte: O autor

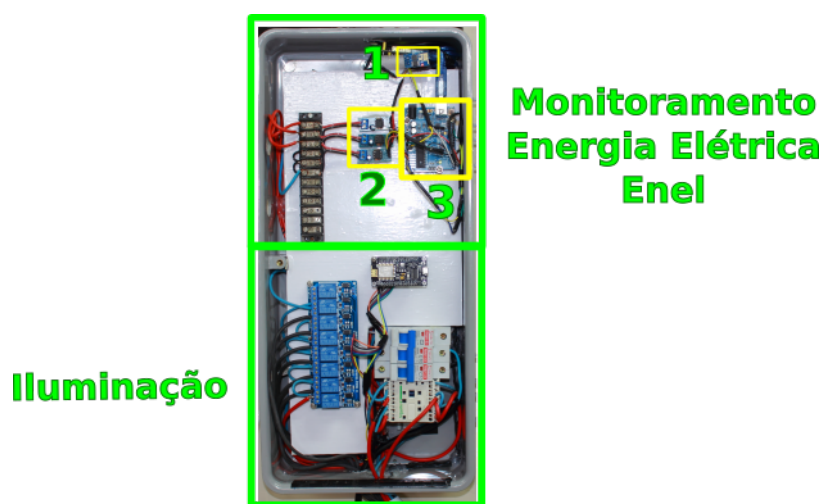
APÊNDICE F – Subsistema de Monitoramento da Rede Elétrica

Figura 92 – Conexão dos componentes - Monitoramento da rede elétrica



Fonte: O autor

Figura 93 – Módulo de monitoramento da rede elétrica



Fonte: O autor

1. ESP8266-01: Módulo WiFi utilizado na comunicação entre o sistema supervisor e o microcontrolador de monitoramento da rede elétrica;
2. Sensores de tensão conectados às portas analógicas do Arduino. Utilizam um optoacoplador com a finalidade de proteger o circuito do sensor.

3. Arduíno é o microcontrolador que integrado com o ESP transmite informações para o sistema supervisorio;
4. Sensores de corrente SCT-013, são mostrados na Figura 92. Estes sensores podem de realizar leituras de até 100 A.

Figura 94 – Versão final do módulo de monitoramento da rede elétrica



Fonte: O autor

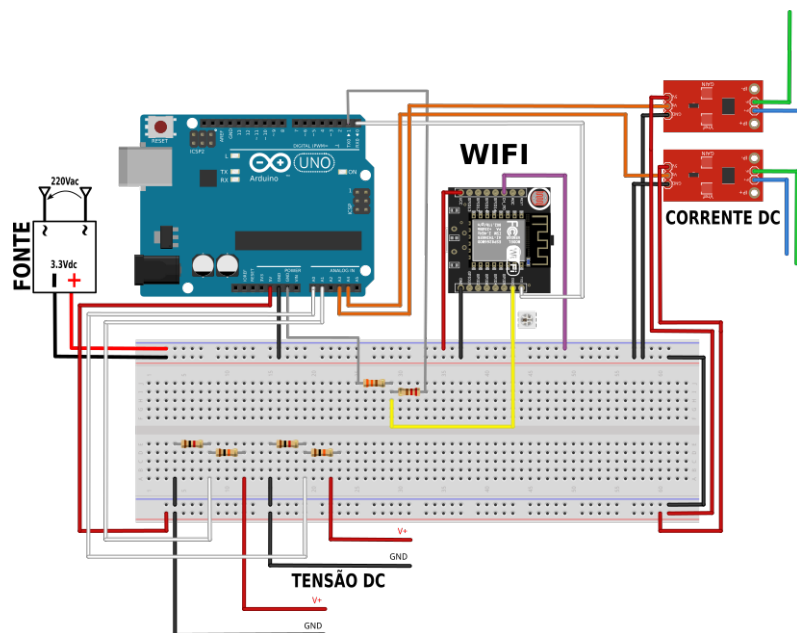
Figura 95 – Medidor de qualidade de energia



Fonte: O autor

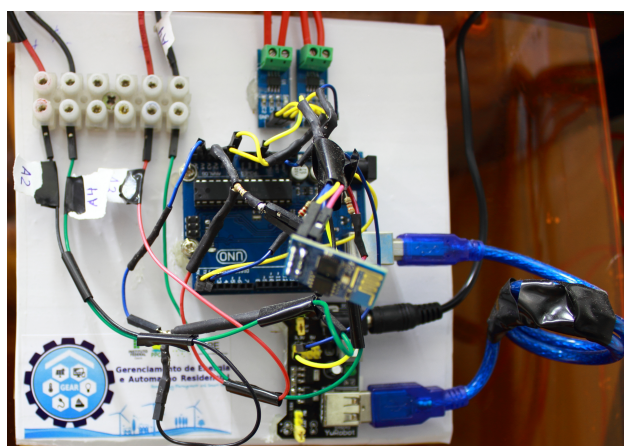
APÊNDICE G – Subsistemas de Monitoramento da Energia Solar FV

Figura 96 – Conexão dos componentes - Monitoramento da energia solar FV



Fonte: O autor

Figura 97 – Módulo de monitoramento do subsistema FV1



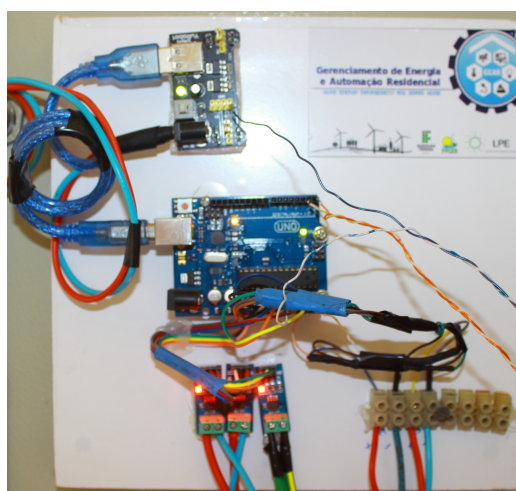
Fonte: O autor

Figura 98 – Painel elétrico do controlador de carga do subsistema FV1



Fonte: O autor

Figura 99 – Módulo de monitoramento do subsistema FV2



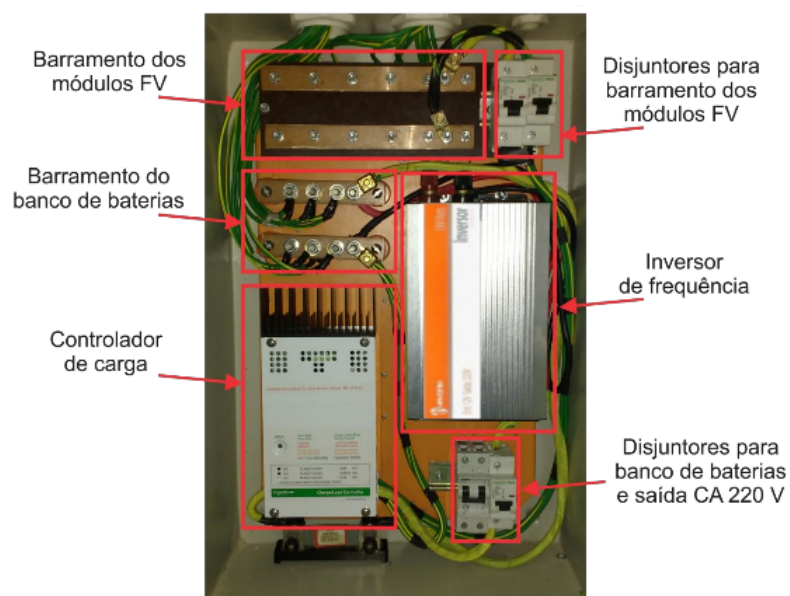
Fonte: O autor

Figura 100 – Matriz de painéis do subsistema FV2



Fonte: O autor

Figura 101 – Painel elétrico do subsistema FV2



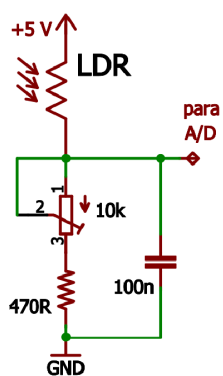
Fonte: Adaptado de Santos (2017)

Figura 102 – Banco de baterias do subsistema FV2



Fonte: O autor

Figura 103 – Circuito do Piranômetro



Fonte: O autor

APÊNDICE H – *Interfaces gráficas do Sistema Supervisório Ayla*

Figura 104 – Informação de previsão do tempo



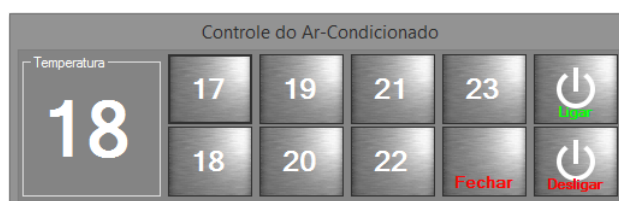
Fonte: O autor

Figura 105 – Configuração do sistema



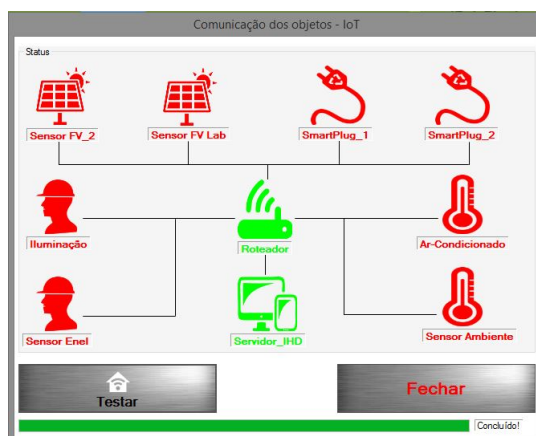
Fonte: O autor

Figura 106 – Controle dos AC



Fonte: O autor

Figura 107 – Testes de comunicação

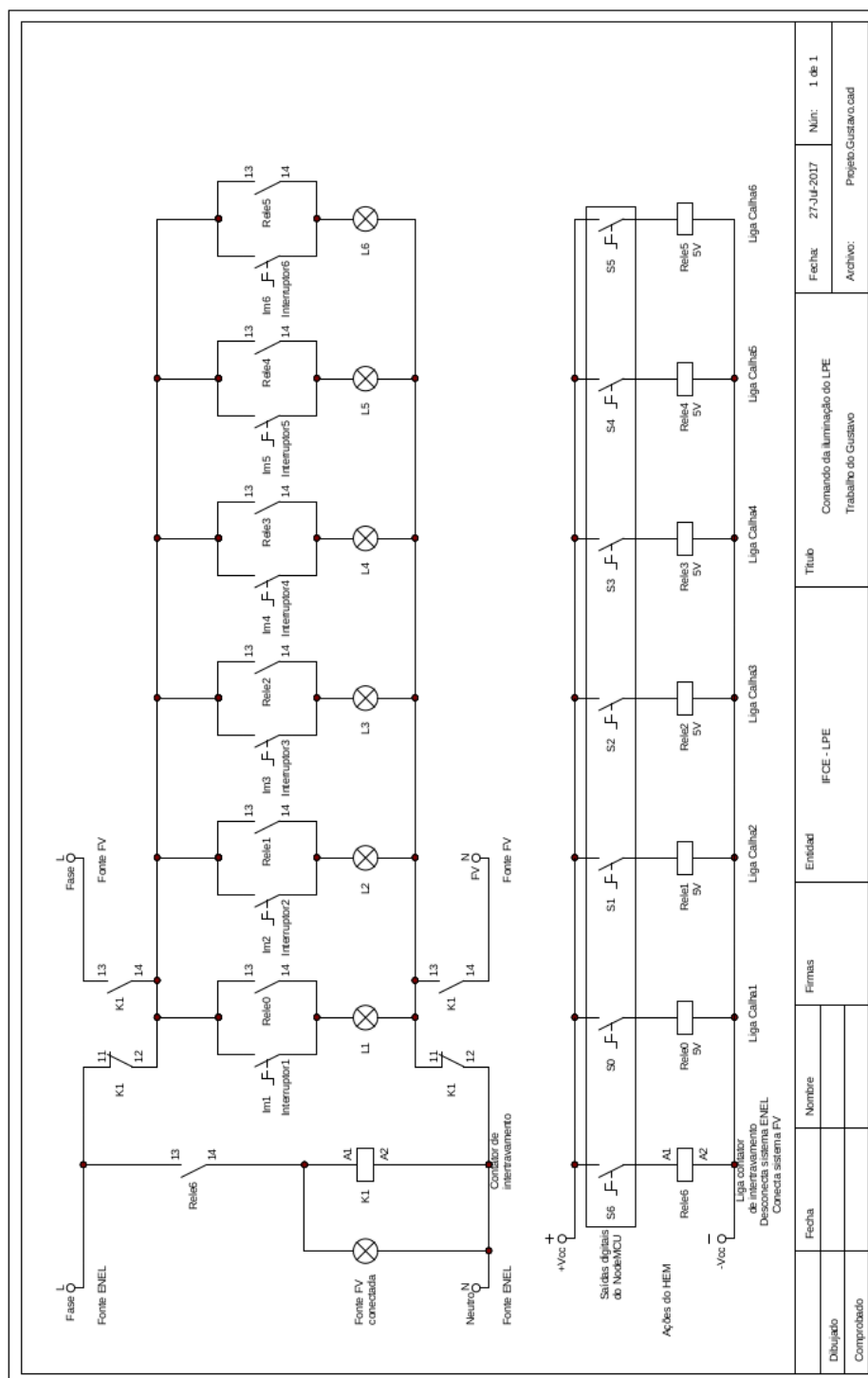


Fonte: O autor

Anexos

ANEXO A – Subsistema de Iluminação

Figura 108 – Esquema elétrico de comutação



Fonte: O autor