

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**INSTALAÇÃO DE UMA MICRORREDE FOTOVOLTAICA
CONECTADA/ISOLADA COM ESTOCAGEM E MONITORAMENTO COM
CONTROLE DA CARGA ALIMENTADA**

RICARDO MACHADO DIAS

Dissertação de Mestrado

**São Leopoldo
2015**

**INSTALAÇÃO DE UMA MICRORREDE FOTOVOLTAICA
CONECTADA/ISOLADA COM ESTOCAGEM E MONITORAMENTO COM
CONTROLE DA CARGA ALIMENTADA**

Ricardo Machado Dias

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Arno Krenzinger – PROMEC UFRGS

Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan – PPG – Eng. Mecânica Unisinos

Prof. Dr. Paulo Wander – PPG – Eng. Mecânica Unisinos

D541i Dias, Ricardo Machado.
 Instalação de uma microrrede fotovoltaica conectada/isolada
 com estocagem e monitoramento com controle da carga
 alimentada / Ricardo Machado Dias. – 2015.
 117 f. : il. ; 30 cm.

 Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos
 Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
 2015.

 "Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias."

 1. Microrrede fotovoltaica. 2. Sistema de aquisição. 3. Sistema
 de supervisor. I. Título.

CDU 621

Dedico este trabalho a minha família.

Aline, Bernardo e Isabela.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu professor orientador, Professor João Batista, por suas valiosas informações, críticas e sugestões, que foram fundamentais para a conclusão do trabalho além do desenvolvimento pessoal durante esse período.

Aos professores do curso de Física, Carmo Heinemann, Martin Fleck e a professora Rosa Maria Grings que acreditaram no meu potencial e contribuíram na minha entrada no mestrado.

A todos os professores do PPG que contribuíram para meu desenvolvimento acadêmico, além das secretárias do programa que sempre estiveram dispostas a ajudar e a tirarem dúvidas.

Aos colegas que surgiram durante o curso e que contribuíram com suas ideias e sugestões, além das trocas de informações.

Aos colegas de trabalho do Senai Cetemp que ajudaram através de diálogos técnicos na resolução de dúvidas que vinham surgindo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, possibilitando o ingresso no programa de mestrado.

Um agradecimento especial a minha amada esposa Aline que enfrentou momentos difíceis durante minhas ausências com a difícil tarefa de educar nossos filhos Bernardo e Isabela.

“Nenhum homem realmente produtivo pensa
como se estivesse escrevendo uma dissertação.”

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho trata do desenvolvimento e do comissionamento de uma microrrede fotovoltaica de 1680 W pico conectada/isolada com estocagem para gerenciamento e controle de uma carga considerada crítica. Esta microrrede, empregando duas tecnologias de módulos, foi instalada no Laboratório de Energias Renováveis da Unisinos. A microrrede é composta de dois painéis de módulos, um de 1080 W de silício multicristalino, e um de 600 W de silício monocristalino. O primeiro é do sistema conectado à rede e o segundo é do sistema isolado, respectivamente. O sistema de gerenciamento e controle, chamado de supervisor, monitora e controla as duas redes através do sistema de aquisição de dados, que possui como tarefa o armazenamento dos dados em um cartão de memória além de mostrar em tempo real as variáveis envolvidas no processo através de um display de cristal líquido. São feitas análises dos valores de correntes e tensões, tanto alternada quanto contínua, para determinação das potências de entrada e de saída dos equipamentos envolvidos no processo, como também variáveis como temperatura ambiente e do painel FV e irradiância. A proposta deste estudo é demonstrar a disponibilidade do sistema para satisfazer uma carga que pode ser considerada como um processo crítico, a fim de entregar uma potência constante para a carga. Para isto, é necessário que a carga seja comutada entre os sistemas conectado à rede e isolado de acordo com as variáveis analisadas pelo sistema de aquisição de dados. As análises dos dados são divididas em duas partes: sistema FV conectado à rede e sistema isolado. Para cada sistema, foi analisado o comportamento da tensão, corrente e potência dos painéis fotovoltaicos, assim como o comportamento dos inversores e banco de estocagem de energia, considerando dias com céu claro e céu nublado. Para o dia de céu claro analisado, foi injetado na rede da concessionária 5,8 kWh de energia. A eficiência global, η_s deste sistema conectado ficou na ordem de 9 %. O sistema de aquisição de dados e controle da microrrede mostrou-se adequado com o propósito de alimentar a carga em permanência. Sempre que a rede da concessionária é desligada, a carga é automaticamente direcionada para o sistema isolado. Quando o banco de estocagem atinge 50 % de sua capacidade, a carga volta a ser alimentada pelo sistema conectado em paralelo com a rede da concessionária.

Palavras-chave: Microrrede Fotovoltaica. Sistema de Aquisição. Sistema de Supervisorio.

ABSTRACT

This work deals with the development and commissioning of a photovoltaic micro-grid 1680 W connected/alone with storage for management and control of a load considered critical. This micro-grid, employing two PV modules technologies, was installed on Renewable Energy Laboratory at Unisinos. The micro-grid panels is composed of two modules, a 1080 W multicrystalline silicon, and a 600 W of monocrystalline silicon. The first is a grid-connected system and the second is a stand-alone system, respectively. The management and control system, called supervisory, monitors and controls the two systems via data acquisition, which has the task of storing the data on a memory card in addition to showing real-time variables involved in the process through a liquid crystal display. Are made analysis of current values and voltages, AC and DC, to determine the input and output power of the equipment involved in the process, as well as variables such as ambient temperatures and PV module and irradiance. The purpose of this study is to prove availability of the system to meet a load that can be considered as a critical process, in order to maintain a constant power to the load. For this, it is necessary that the load is switched between systems connected to the grid and alone, according to the variables analyzed by the data acquisition system. The analyzes of the data are divided into two parts: PV grid-connected and alone system. For each system, the behavior of tension was analyzed, current and power of the PV panels, as well as the behavior of inverters and power storage bank, considering days with clear skies and overcast sky. For clear sky days analyzed, it was injected into the mains 5.8 kWh of energy. The overall efficiency of this system connected, η_s is 9 %. The data acquisition and control system micro-grid was adequate for the purpose of feeding a remaining charging. Whenever, the mains is switched off, the load is automatically directed to the alone system. When the storage capacity of the database reaches 50%, the load is once again powered by the connected system in parallel with the utility grid.

Key-words: PV Micro-Grid. System Acquisition. Supervisory System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Exemplificação de um sistema de geração distribuída com um ponto de conexão.	25
Figura 2.2 - Variação da irradiância solar extraterrestre ao longo do ano.....	27
Figura 2.3 - Representação dos ângulos envolvidos no posicionamento de uma superfície plana em relação aos raios solares.....	28
Figura 2.4 - Piranômetro Termoelétrico (A) e Piranômetro Fotovoltaico (B).	29
Figura 2.5 - Pireliômetro Termoelétrico.....	29
Figura 2.6 - Associação de duas células em série, e o mesmo que ocorre com os módulos FV	31
Figura 2.7 - Associação de duas células em paralelo, e o mesmo ocorre com os módulos FV.	32
Figura 2.8 - Esquema típico de um sistema autônomo.....	33
Figura 2.9 - Esquema básico de um SFCR com inversor central.....	34
Figura 2.10 - Modelo de uma bateria chumbo-ácido.....	42
Figura 2.11 - Esquemática de um sistema Supervisório.....	45
Figura 3.1 - Topologia da microrrede FV isolada/conectada.....	47
Figura 3.2 - Painéis FV com duas tecnologias de módulos FV, silício mono e multicristalino.	48
Figura 3.3 - Módulo Kyocera modelo KD135SX-UPU.....	48
Figura 3.4 – Painel fotovoltaico com 8 módulos multicristalino ligados em série.	49
Figura 3.5 - Módulo fotovoltaico Siemens Modelo SP75.....	50
Figura 3.6 - Configuração do painel fotovoltaico com 8 módulos monocristalinos.	50
Figura 3.7 - Inversor Sunny Boy 1200.	51
Figura 3.8 - Inversor Senoidal Puro 1000 W/ 24V.....	52
Figura 3.9 - Controlador de carga MPPT – Trace-3215RN.....	53
Figura 3.10 - Banco de estocagem de 24 V/100 Ah.....	54
Figura 3.11 - Quadro com sistema de aquisição de dados.	55
Figura 3.12 - Topologia utilizada para controle da microrrede.....	56
Figura 3.13 - Arduino ATmega2560.....	57
Figura 3.14 - Placa do sensor de corrente.....	58
Figura 3.15 - Representação da faixa de trabalho do sensor ACS712-30.....	58
Figura 3.16 - Sensor de tensão montado e circuito elétrico.	59

Figura 3.17 - Amostra dos dados visualizados no Microsoft Excel.....	60
Figura 3.18 - <i>Shield SD</i> utilizado no sistema.	60
Figura 3.19 - Display LCD utilizado.....	61
Figura 3.20 - RTC modelo DS1307.	62
Figura 3.21 - Fonte de alimentação do sistema de monitoramento e controle da microrrede..	63
Figura 3.22 - Módulo utilizado para medir a irradiância.....	63
Figura 3.23 - Sensor fotodiodo da estação meteorológica UNISINOS.....	64
Figura 3.24 - Sensor de temperatura modelo LM35.....	65
Figura 3.25 - Localização dos sensores de temperatura ambiente e de célula.	65
Figura 3.26 - Trecho do algoritmo da rotina principal.	67
Figura 3.27 - Visualização de uma das telas apresentada no sistema.	68
Figura 3.28 - Esquema de ligação do display LCD e uma das funções que apresentam as variáveis no display.	68
Figura 3.29 - Esquema de ligações dos sensores LM35 e fluxograma básico para determinar valores de temperaturas de célula e ambiente.	69
Figura 3.30 - Relações das tensões dos divisores de tensão.....	70
Figura 3.31 - Trecho do algoritmo que faz a leitura de tensão do banco de estocagem.....	70
Figura 3.32 - Trecho do algoritmo que executa a função de leitura da corrente contínua do painel FV.	72
Figura 3.33 - Balanço das correntes elétricas do sistema isolado.	72
Figura 3.34 - Trecho do algoritmo com a função de leitura de tensão da carga.....	74
Figura 3.35 - Sequência das ligações dos sensores de corrente ACS712.....	75
Figura 3.36 - Forma de onda da corrente alternada.....	76
Figura 3.37 - Função que determina o valor de corrente elétrica alternada na carga.....	76
Figura 3.38 - Fluxos de correntes elétrica no SFCR.	77
Figura 3.39 - Função que faz o tratamento do valor da irradiância.....	78
Figura 4.1 - Representação da irradiância de um dia de céu claro.	79
Figura 4.2 - Perfis de potências de entrada e saída do inversor <i>Sunny Boy 1200</i>	80
Figura 4.3 - Verificação dos sentidos das correntes elétricas da carga, saída do inversor e da rede da concessionária.	81
Figura 4.4 - Comportamento da tensão do painel FV com relação ao aumento da temperatura do módulo.....	82
Figura 4.5 - Representação da irradiância de um dia de céu encoberto.	82
Figura 4.6 - Perfis de potências de entrada e saída do inversor <i>Sunny Boy 1200</i>	83

Figura 4.7 - Verificação dos sentidos das correntes elétricas da carga, saída do inversor e rede da concessionária.....	84
Figura 4.8 - Momento do desligamento e religamento da rede da concessionária.....	85
Figura 4.9 - Comportamento das potências e da tensão do banco de estocagem.....	86
Figura 4.10 - Fluxos de correntes elétricas do SFI.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Tensões nos terminais da bateria em função da descarga.	40
Tabela 3.1 - Valores do módulo na condição padrão de teste.	49
Tabela 3.2 - Condição padrão de teste do módulo SP75	51

LISTA DE ABREVIATURAS

A/D	Analógico/Digital
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	American Society for Testing and Materials
c.a.	Corrente alternada
c.c.	Corrente Contínua
CEC	Comunidade Econômica Europeia
CI	Circuito Integrado
CLP	Controlador Lógico Programável
CSV	Comma Separated Values
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
FV	Fotovoltaico
FVLA	Free Vented Lead Acid
GEDAE	Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas
GSM	Global System for Mobile Communications
IEE	Instituto de Eletrotécnica e Energia
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitter Diode
LSB	Least Significant Bit
MPPT	Maximum Power Point Tracker
MVA	Mega Volt Ampère
MW	Mega Watt
NBR	Norma Brasileira de Regulação
NOCT	Nominal Operating Cells Temperature
PCI	Placa de Circuito Impresso
PWM	Pulse Width Modulation
RS232	Recommend Standard 232
RTC	Real Time Clock
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SD Card	Secure Digital Card
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

SFI	Sistema Fotovoltaico Individual
SIST.AQUIS.	Sistema de aquisição de dados
SOC	State of Charge
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UC	Unidade Consumidora
USB	Universal Serial Bus
USP	Universidade de São Paulo
VRLA	Valve Regulated Lead Acid
WRC	World Radiation Center

LISTA DE SIMBOLOS

A_{ger}	Área do gerador fotovoltaico [m^2]
B_{dia}	Consumo médio diário da carga [Ah/d]
C_{20}	Capacidade nominal da bateria [Ah]
C_u	Capacidade útil da bateria [Ah]
E_{ca}	Energia elétrica entregue à rede [kWh]
E_{cc}	Energia elétrica na saída do gerador FV [kWh]
E_{ch}	Fração de energia existente na bateria [%]
E_{ger}	Energia solar no plano do gerador [kWh]
G	Irradiância incidente no plano do gerador [kW/m^2]
G_{ce}	Irradiância de $1 kW/m^2$
G_M	Irradiância média na célula padrão [kW/m^2]
H	Irradiação média no plano do gerador [kWh/m^2]
I	Corrente elétrica [A]
$i(t)$	Corrente elétrica da bateria [A]
I_{BAT}	Corrente do banco de estocagem [A]
$I_{CONCESSIONÁRIA}$	Corrente elétrica na rede da concessionária [A]
$I_{CONT.}$	Corrente elétrica de saída do controlador de carga [A]
$I_{ENTRADA_INV}$	Corrente na entrada do inversor do sistema FV isolado [A]
I_{FV}	Corrente elétrica do painel FV [A]
I_{FV_ISO}	Corrente elétrica do painel FV do sistema isolado [A]
$I_{SAÍDA_CONT}$	Corrente de saída do controlador de carga [A]
$I_{SAÍDA_INV}$	Corrente elétrica de saída do inversor [A]
I_{ccmax}	Corrente elétrica contínua máxima [A]
I_{FV_con}	Corrente elétrica do painel FV da rede conectada [A]
I_{mpp}	Corrente do ponto de máxima potência [A]
I_{SC}	Corrente de curto circuito [A]
LSB	Least Significant Bit [%]
N_{dia}	Número de dias de autonomia do sistema [-]
P	Potência elétrica [W]
P_{Carga}	Potência elétrica consumida pela carga [W]
$P_{Conces.}$	Potência elétrica da rede da concessionária [W]
P_{ca}	Potência elétrica entregue à rede [W]
P_{ca}	Potência elétrica na saída do inversor [W]
P_{camax}	Potência máxima de em tensão alternada [W]
P_{canom}	Potência nominal em tensão alternada [W]
P_{cc}	Potência elétrica na saída do gerador FV [W]

P_{cc}	Potência elétrica na entrada do inversor [W]
P_{ccmax}	Potência máxima de em tensão contínua [W]
P_d	Profundidade de descarga [%]
$Q(t_0)$	Tensão de circuito aberto da bateria [V]
R_t	Coefficiente redutor de temperatura [°C]
u_a	Incerteza combinada para tensão alternada [%]
u_{acs}	Incerteza do sensor ACS712 [%]
u_c	Incerteza combinada para tensão contínua [%]
U_{shunt}	Incerteza do resistor shunt [%]
V	Tensão elétrica [V]
$V_{Banco_Est.}$	Tensão do banco de estocagem [V]
V_{acs}	Tensão no sensor ACS712 [mV]
V_{ca}	Faixa de tensão MPPT [V]
V_{cc}	Tensão em corrente contínua [V]
V_{ccmax}	Tensão máxima na entrada do inversor [V]
V_{FV_con}	Tensão elétrica do painel FV da rede conectada [V]
V_{FV_iso}	Tensão painel FV sistema isolado [V]
V_{mpp}	Tensão do ponto de máxima potência [V]
V_{nom}	Tensão nominal do inversor em corrente contínua [V]
V_{OC}	Tensão de circuito aberto [V]
w_{ACS}	Incerteza do sensor de corrente ACS712 [%]
$w_{ARDUINO}$	Incerteza do Arduino [%]
w_{CEL}	Incerteza da célula padrão [%]
w_i	Incerteza combinada da corrente elétrica [%]
w_{irrad}	Incerteza combinada da irradiância [%]
w_{LM35}	Incerteza do sensor de temperatura LM35 [%]
w_{MINIPA}	Incerteza do multiteste Minipa [%]
w_{pca}	Incerteza combinada da potência em c.a. [%]
w_{pcc}	Incerteza combinada da potência em c.c. [%]
w_r	Incerteza combinada [%]
w_{temp}	Incerteza combinada da temperatura [%]
w_v	Incerteza combinada da tensão [%]
w_{vca}	Incerteza combinada da tensão em c.a. [%]
w_{vcc}	Incerteza combinada da tensão em c.c. [%]

Símbolos Gregos

α_{carga} Constante de eficiência de carga

β Ângulo de inclinação do gerador fotovoltaico com a superfície horizontal [°]

γ Ângulo de orientação do gerador fotovoltaico, azimute [°]

T Período de operação do sistema [dia]

η_{inv} Eficiência do inversor [-]

η_s Eficiência global do sistema [-]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	20
1.1 OBJETIVOS.....	21
1.1.1 Objetivo Geral	21
1.1.2 Objetivos Específicos.....	21
1.2 JUSTIFICATIVA	22
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	24
2.2 A ENERGIA DO SOL	26
2.3 INSTRUMENTOS PARA MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR.....	28
2.4 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	30
2.5 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	32
2.5.1 Sistemas autônomos	32
2.5.2 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR)	33
2.6 SISTEMAS HÍBRIDOS	35
2.6.1 Estudos relacionados aos sistemas FV e gerenciamento.....	37
2.7 BANCO DE ESTOCAGEM	39
2.7.1 Baterias.....	39
2.7.1.1 Baterias de chumbo - ácido.....	41
2.8 INVERSORES	42
2.9 CONTROLADORES DE CARGA.....	43
2.10 SISTEMA SUPERVISÓRIO	44
3 METODOLOGIA.....	47
3.1 SISTEMA DE GERAÇÃO	47
3.1.1 Descrição da Instalação	47
3.1.2 Módulos Fotovoltaicos	48
3.1.3 Inversores c.c./c.a.	51
3.1.4 Controlador de Carga.....	53
3.1.5 Banco de Estocagem de Energia	54
3.1.6 Dispositivos de Proteção Contra Surtos - DPS	55
3.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO.....	55
3.2.1 Descrição dos Componentes de Controle.....	56

3.2.1.1	Plataforma de desenvolvimento Arduino	56
3.2.1.2	Sensor de corrente ACS712.....	57
3.2.1.3	Sensor de Tensão	59
3.2.1.4	Shield SD	59
3.2.1.5	Display de Cristal Líquido.....	60
3.2.1.6	Chaveamento da carga	61
3.2.1.7	Ventilação	61
3.2.1.8	Relógio de tempo real RTC	62
3.2.1.9	Fonte de alimentação	62
3.2.1.10	Monitoramento da Irradiância	63
3.2.1.11	Monitoramento das temperaturas ambiente e de célula.....	64
3.3	SISTEMA DE CONTROLE	65
3.3.1	Algoritmo na Plataforma Arduino.	66
3.3.1.1	Apresentação das telas	68
3.3.1.2	Determinação das Temperaturas Ambiente e de Célula.....	69
3.3.1.3	Determinação das Tensões Elétricas Contínuas	69
3.3.1.4	Determinação das Correntes Elétricas Contínuas.....	71
3.3.1.5	Determinação das Tensões Elétricas Alternadas	74
3.3.1.6	Determinação das Correntes Elétricas Alternada	75
3.3.1.7	Determinação do Valor de Irradiância.....	77
4	RESULTADOS	79
4.1	SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE.....	79
4.1.1	Dia de céu claro	79
4.1.2	Perfis de potências no SFCR	80
4.1.3	Fluxo de corrente no SFCR.....	80
4.1.4	Variação da tensão do painel com a temperatura.....	81
4.1.5	Dia de céu parcialmente encoberto.....	82
4.1.6	Perfis de potência para o dia encoberto	83
4.1.7	Fluxo de corrente no SFCR.....	83
4.2	SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO.....	84
4.2.1	Perfis de Potências no SFI	85
4.2.2	Fluxo de corrente no SFI	86
4.3	ANÁLISE DAS INCERTEZAS.....	88
4.3.1	Propagação de erros.....	88

4.3.1.1 Incertezas nas correntes contínuas e alternadas.....	89
4.3.1.2 Incertezas nas tensões contínuas e alternadas.....	89
4.3.1.3 Incertezas nas potências contínuas e alternadas.	90
4.3.1.4 Incertezas nas temperaturas	90
4.3.1.5 Incerteza na irradiância.....	90
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	91
REFERÊNCIAS	93
APENDICE A – FLUXOGRAMAS BÁSICOS DAS FUNÇÕES IMPLEMENTADAS.	97
APENDICE B – ALGORITMO COMPLETO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO	103

1 INTRODUÇÃO

Numa fria tarde do dia 4 de setembro de 1882, cercado por empresários e banqueiros reunidos em Nova Iorque, mais precisamente na *Wall Street*, Thomas Edison ligou um interruptor, patenteado por ele mesmo, e acendeu 100 de suas lâmpadas incandescentes.

A partir desse momento dava-se início a corrida pela eletricidade. Desde o início, Thomas Edison já se preocupava com a segurança de sua rede elétrica de baixa tensão, gerada por sua própria usina de energia elétrica de corrente contínua, onde seus condutores eram enterrados no solo por medida de segurança para que a população se sentisse confiante nessa nova tecnologia e começasse a usufruí-la. (BBC, 2012).

Apesar de inovadora, essa tecnologia não era muito eficiente, pois era necessário que as usinas ficassem muito próximas das áreas de consumo, tendo assim um custo muito elevado.

Com um pensamento diferente, no qual queria que a eletricidade fosse disponível a todos e de forma gratuita, Nicolas Tesla desenvolveu a tensão alternada, onde poderiam se transmitir eletricidade a longas distâncias, diminuindo as perdas por efeito Joule nos condutores.

Para o desenvolvimento dessa tecnologia, entrou em cena um rico empresário, George Westinghouse que, juntamente com Tesla, queria que a corrente alternada fosse a base para o sistema de transmissão de energia elétrica, gerando nesse momento a famosa Guerra das Correntes, Thomas Edison com a tensão contínua e Westinghouse e Tesla com a tensão alternada.

Ainda hoje o homem está à procura por novas tecnologias que proporcionem a ele e a sua família maior conforto e segurança. Aliado a isso, a energia elétrica é um dos fatores que mais influenciam nesse contexto, mas tem um preço a pagar.

Tanto para o consumidor final quanto para a indústria, e até mesmo para as distribuidoras de energia elétrica, é importante que a transmissão seja de qualidade e que não haja perdas.

Em prol de um sistema de qualidade, as concessionárias estão adotando sistemas de controle e monitoramento de suas redes a fim de facilitarem seu processo de manutenção e saberem quais os pontos onde possuem um consumo maior de eletricidade e quais os pontos que necessitam de nova reestruturação da rede, assim conseguem fornecer energia com confiabilidade para seus consumidores.

Aliado a isso existem sistemas no qual essa confiabilidade deve ser mantida a qualquer custo, sendo esses casos considerados como processos críticos, onde em hipótese alguma pode ocorrer a falta de energia elétrica, como em um centro cirúrgico, onde vidas podem estar dependendo de energia elétrica.

Para solucionar esses problemas, as redes híbridas servem como uma possibilidade. Elas são constituídas por arranjos de módulos fotovoltaicos, acumuladores de energia e sistema auxiliar, que pode ser um gerador a gás ou biodiesel e/ou rede elétrica da concessionária, sendo o banco de acumuladores de energia carregado através do aporte energético do sistema fotovoltaico.

A gestão desta microrrede é realizada por um sistema de gestão específico, o qual administra a entrada e saída de energia no banco de estocagem e também entrega energia para a carga solicitante. O sistema auxiliar justifica-se como suporte em caso de vários dias consecutivos sem a presença eficaz da energia solar ou em dias chuvosos.

Além do benefício tecnológico, a relevância deste trabalho está no caráter didático e pedagógico, pois o mesmo será também utilizado em treinamentos aos alunos da comunidade universitária, incentivando a pesquisa deste tipo de fonte alternativa.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver e instalar um sistema de monitoramento e controle de uma microrrede FV conectada/isolada com estocagem que seja capaz de alimentar cargas consideradas críticas e que tome decisões por meio de dados monitorados e armazenados com o propósito de garantir a disponibilidade e o fornecimento constante de energia elétrica para uma carga.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Executar a construção de um quadro de comando, composto por conjuntos elétricos e eletrônicos destinados a coletas de dados do sistema;
- Instalar a microrrede e realizar testes de funcionamento;
- Desenvolver hardwares que sejam capazes de coletar dados de tensão e corrente alternada e contínua, irradiância e temperatura formando o sistema de aquisição de dados;

- Desenvolver um software de tratamento e controle dos dados monitorados pelo sistema de aquisição para tomadas de decisões e garantir a disponibilidade de energia para a carga e posterior armazenamento em um cartão de memória.

1.2 JUSTIFICATIVA

Dentro de vários ramos, como na indústria alimentícia, na hospitalar e no acadêmico, há alguns processos nos quais é imprescindível a garantia do fornecimento de energia elétrica. Em uma produção alimentícia, caso haja a falta de energia elétrica, pode ocorrer que muitos alimentos estraguem durante o processo, causando enormes prejuízos para a empresa.

No ramo hospitalar, uma pessoa pode perder a vida caso haja a falta de energia elétrica durante um processo cirúrgico. Em regiões isoladas onde o sistema de energia elétrico é precário, um posto de saúde não pode ficar sem energia elétrica, podendo estragar doses de vacinas que devem ficar sob refrigeração, trazendo enorme prejuízo para a população.

Considerando o ramo acadêmico um pesquisador pode perder dados valiosos de suas pesquisas caso não usufrua de um sistema que impeça a falta de energia, como em processos de simulações onde computadores podem ficar semanas executando tarefas para encontrar o comportamento de um determinado fenômeno.

A esses e outros casos, pode-se dizer que se trata de processos críticos, não podendo ocorrer falta de energia elétrica. Segundo Hirakawa (2013), “Processo crítico é tudo aquilo que pode acarretar graves prejuízos caso apresente alguma falha”. Sendo assim, esse estudo visa desenvolver um sistema de gerenciamento e de controle de uma microrrede FV conectada/isolado com estocagem com a finalidade de servir como alternativa para determinados processos considerados críticos onde não pode haver a falta de energia elétrica.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Neste trabalho, além do capítulo de introdução, são apresentados mais 4 capítulos, onde estão descritos os principais conceitos para a elaboração da dissertação.

O capítulo 2 apresenta os referenciais teóricos necessários ao desenvolvimento do trabalho, assim como as características gerais dos componentes utilizados na microrrede.

O capítulo 3 é destinado aos materiais e métodos utilizados para a elaboração do trabalho, explanando os sistemas de geração, aquisição e controle, além das análises de incertezas envolvidas no processo.

O capítulo 4 é destinado aos resultados obtidos trazendo o comportamento de todo o sistema.

O capítulo 5 apresenta a conclusão final dessa dissertação e as propostas dos futuros trabalhos a serem desenvolvidos.

Nos apêndices estão os fluxogramas simplificados do programa implementado na plataforma Arduino, além do algoritmo completo com todas suas funções e condições de funcionamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por finalidade apresentar os principais conceitos relacionados aos assuntos abordados neste trabalho.

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Segundo o *standard* 1547 da IEEE¹, entende-se por geração distribuída, no acrônimo em inglês *distributed generation* ou também *distributed resources*, como fonte de energia elétrica não conectada diretamente ao sistema de transmissão em massa de energia². Ainda, a referida norma traz uma condição intrínseca, limitando a potência total em até 10 MVA (“*the criteria and requirements in this document are applicable to all distributed resource technologies, with aggregate capacity of 10 MVA or less*”). Outro documento da IEEE também define geração distribuída como unidades de produção de energia elétrica conectadas ao sistema de distribuição³ de energia elétrica, de pequeno porte, e que são geralmente instaladas pelos consumidores finais, para o seu uso exclusivo ou não (IEEE, 2002).

Entretanto, os novos artigos do setor, como por exemplo, o publicado na T&D (2014), já traz uma nova visão ao termo geração distribuída. Este artigo trata os painéis fotovoltaicos, instalados nos telhados das casas, como uma “geração disruptiva”, em razão do potencial energético desta fonte. Este novo termo é motivado levando em consideração os benefícios gerados pela energia “limpa”, mas também considera os riscos que podem ser provocados à operação do sistema com a instalação expressiva de pequenos módulos, tais como a flutuação de tensão, a possibilidade de inversão do fluxo de potência e possíveis problemas de *power quality*. O artigo sobre impacto da inserção de geração distribuída em telhados de consumidores na rede de baixa tensão, relacionando aspectos tarifários e regulatórios, são objetivos do Projeto 120 telhados fotovoltaicos no Brasil. (Rampinelli, Krenzinger e Bühler, 2014). A Figura 2.1 ilustra o ponto de conexão da geração distribuída ao sistema elétrico de potência.

¹ *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

² Transporte de grande quantidade de energia para grandes distâncias, geralmente em tensões superiores a 69 kV.

³ Por sistema de distribuição ou rede de distribuição entende-se como a área de atuação de uma distribuidora de energia elétrica, em tensão inferiores a 69 kV (PRODIST, 2014).



Figura 2.1 - Exemplificação de um sistema de geração distribuída com um ponto de conexão.
Fonte: Adaptado pelo autor

Lora e Haddad (2006) complementam geração distribuída como “uma fonte de geração conectada diretamente na rede de distribuição ou ao consumidor”, cuja geração ocorra no ponto do consumo final ou próximo deste, tratando-se de sistemas de pequena potência até a ordem de alguns MW.

Com relação aos benefícios da geração distribuída, Lora e Haddad (2006) e América do Sol (2014), citam:

- Redução das perdas técnicas e aumento na eficiência na cadeia de transmissão e distribuição de energia;
- Redução, ou postergação, de investimentos em linhas de transmissão e distribuição;
- Necessidade de tornar o sistema elétrico menos vulnerável;
- Grande volume de pesquisas na área envolvendo para o surgimento de novas tecnologias cada vez mais eficientes;
- Possibilidade do uso de insumos regionais para a geração de energia;
- Mudanças na regulamentação, com incentivo à geração distribuída;
- Restrições técnicas e ambientais para a construção de grandes parques geradores (como hidroelétricas e termoelétricas);
- Aumento das exigências ambientais no controle e diminuição na emissão de poluentes;
- Necessidade pela busca na redução tarifária;
- Universalização dos serviços públicos garantindo o acesso à energia elétrica de qualquer consumidor, independente da sua localização;

- Possibilidade de instalação de tecnologias fotovoltaicas integradas ao telhado do consumidor, não exigindo área física dedicada;
- Modularidade e custos mais acessíveis das tecnologias alternativas;
- Evolução do mercado elétrico, com participação ativa dos consumidores;
- Avanço na eletrônica de potência, no tocante ao controle e proteção da rede elétrica;
- Benefício ambiental na geração por fontes renováveis.

A energia produzida por uma geração distribuída e que é injetada na rede de distribuição é passível de compensação financeira, visto tratar-se de uma fonte de energia elétrica. A literatura apresenta duas abordagens para esta compensação (Lora; Haddad, 2006):

- *Dual Metering*: O excedente de energia é enviado à rede, sendo contabilizado através de um medidor de energia exclusivo. Toda energia injetada no sistema é comprada pela concessionária. Paralelamente um segundo medidor é presente junto à residência do cliente, que é responsável por contabilizar a utilização por parte do consumidor. Nesta situação, é interessante que o consumidor consuma naquele instante a energia gerada, não tornando flexível o seu horário de utilização.
- *Net Metering*: Uma evolução do *dual metering*, no qual é instalado apenas um medidor bidirecional⁴. No entanto, a energia excedente e injetada no sistema elétrico é utilizada para compensação, ou seja, ela não é automaticamente comprada. É montado um “banco de energia”; caso, no final do período de faturamento, o consumidor tenha utilizado mais que injetado, terá que pagar a diferença, em caso contrário, a concessionária ressarcirá a diferença. Isso permite que a curva de demanda do consumidor possa ser diferente da curva de geração.

2.2 A ENERGIA DO SOL

A irradiância G é uma potência específica por unidade de área dada pela integral do espectro solar. Ao externo da atmosfera terrestre, denominada de irradiância extraterrestre, seu valor aproximado adotado pelo (*WRC – World Radiation Center*) é de 1367 W/m^2 . Este valor médio emitido pelo sol é atenuado ao chegar à terra, devido à absorção na atmosfera, sendo que ao nível do solo este valor é de 1000 W/m^2 . (CRESESB, 2014). Esse valor sofre

⁴ Que é capaz de realizar a medição nos 4 quadrantes, ou seja, tanto potências ativas ou reativas, entrantes ou saídas.

grande influência devido aos movimentos de rotação e translação da terra e possui uma curva característica, com variação horária e mensal, como a ilustrada na Fig. 2.2.

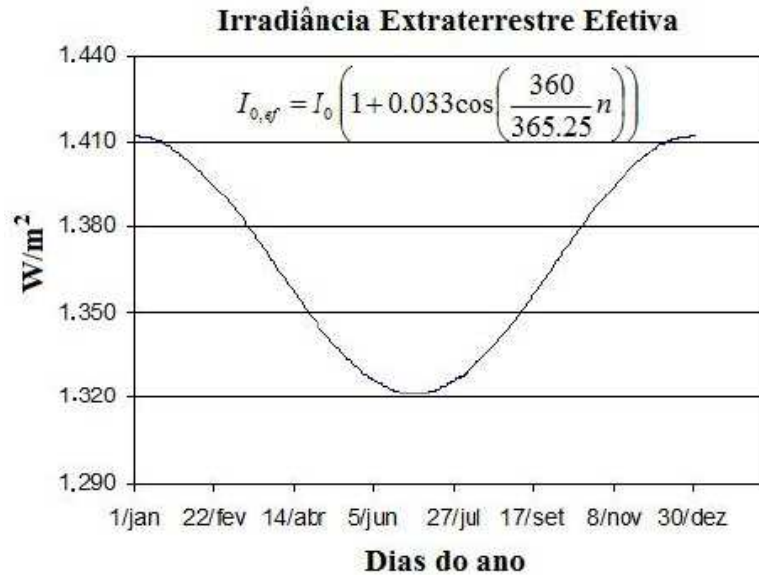


Figura 2.2 - Variação da irradiância solar extraterrestre ao longo do ano.
Fonte: CRESESB (2014).

A irradiação H entende-se como a integral do valor da irradiância G , Eq. 2.1, onde seu valor pode ser calculado para um intervalo diário, mensal ou anual, representado por Γ sendo kWh/m²d sua unidade de medida (CRESESB, 2014).

$$H(\gamma, \beta) = \frac{1}{\Gamma} \int G(t) dt \quad (2.1)$$

Ainda, segundo Pereira e Oliveira (2011), a radiação solar incidente pode ser decomposta em:

- Radiação direta: constituída de todos os raios recebidos em linha com o sol;
- Radiação difusa: é a radiação recebida indiretamente, proveniente da ação da difração da atmosfera;
- Radiação albedo: é a razão entre a radiação refletida e a incidente.

Entretanto a produção de energia elétrica possui dependência não só com a irradiância, mas também com as relações geométricas de posicionamentos dos módulos FV utilizados. Destacam-se o ângulo de inclinação β , que é o ângulo formado pelo plano da superfície em questão e a horizontal, podendo variar de 0° a 90° . O ângulo azimutal do Sol γ_s que representa a relação entre a projeção dos raios solares com o plano horizontal do eixo

norte/sul. A Figura 2.3 representa um plano inclinado e as referências geométricas envolvidas com a radiação solar.

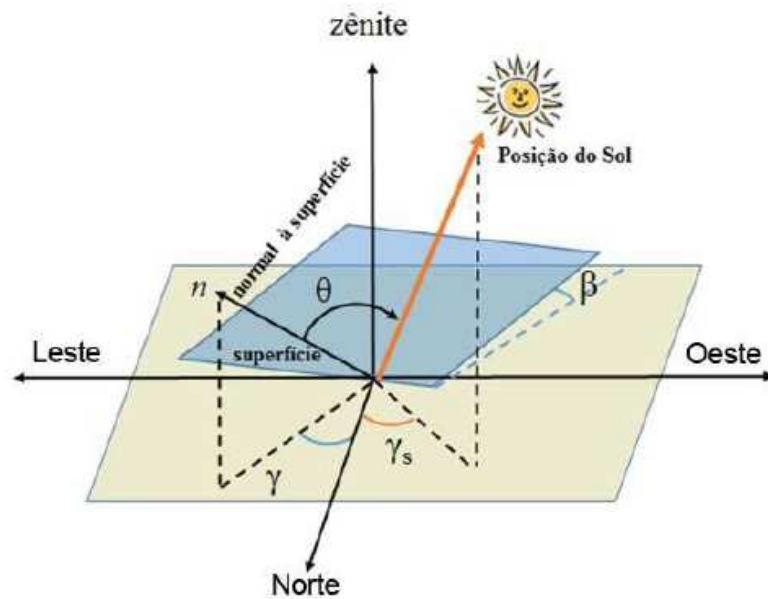


Figura 2.3 - Representação dos ângulos envolvidos no posicionamento de uma superfície plana em relação aos raios solares.
Fonte: CRESESB (2014).

Por isso, a quantidade de energia produzida por um sistema fotovoltaico depende, dentre outros fatores, da irradiação local onde é instalado. As regiões brasileiras Nordeste e Centro-Oeste são as que possuem o maior potencial de aproveitamento, sendo a região Sul a menos privilegiada. No entanto, considerando o cenário global, a região Sul possui uma irradiação melhor do que aquelas encontradas em países que empregam largamente a energia solar fotovoltaica. (VILLALVA, 2012). Ainda a região Sul, com temperaturas médias mais baixas, favorece a produção de energia com menor perdas térmicas nos módulos.

2.3 INSTRUMENTOS PARA MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

Para a produção de energia elétrica e ou térmica através da radiação solar, é de fundamental importância a utilização de equipamentos que possam determinar a quantidade de radiação incidente em um determinado plano. Assim pode-se calcular a produção de energia elétrica produzida, no caso de sistema FV, ou a temperatura de aquecimento da água no caso da solar térmica.

Para executar essa tarefa são utilizados frequentemente dois instrumentos, o piranômetro, destinado à medição da radiação global e o pireliômetro, destinado a medição da

radiação direta. O piranômetro pode ser do tipo termoeletrico, representado na Fig. 2.4 (A), formado de uma termo pilha colocada em seu interior, ou do tipo fotovoltaico, Fig. 2.4 (B), composto por um fotodiodo, que apresenta como vantagem uma rápida resposta a variação da radiação, em contrapartida sua incerteza é maior que a do tipo termoeletrico.



(A)

(B)

Figura 2.4 - Piranômetro Termoeletrico (A) e Piranômetro Fotovoltaico (B).

Para medir a irradiância que incide perpendicularmente à superfície, é utilizado o pireliômetro, apresentado na Fig. 2.5, que deve ficar apontado diretamente para o sol, assim pode-se medir a componente direta, enquanto que a componente difusa é bloqueada através das paredes do equipamento em forma de tubo, onde ao fundo do tubo o sensor termoeletrico fica fixado. Para fixar a posição solar, é necessário um sistema de rastreamento, que pode ser de 1 ou 2 eixos, dependendo da utilização que se deseja obter.



Figura 2.5 – Pireliômetro Termoeletrico.
Fonte: Adaptado pelo autor.

2.4 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A palavra ‘fotovoltaico’ deriva do grego *photo*, que significa luz, e *volt* com referência ao pioneiro Alessandro Volta. O efeito fotovoltaico foi descoberto em 1839 por Edmond Becquerel. A célula fotovoltaica é uma aplicação prática do efeito fotoelétrico estudada em 1887 por Heinrich Hertz e explicado em 1905 por Albert Einstein. (PEREIRA e OLIVEIRA, 2011). A conversão direta da energia solar em energia elétrica, que ocorre nas células fotovoltaicas é uma tecnologia de geração de energia elétrica altamente modular e com quase total ausência de emissões de poluentes e ruídos durante o seu funcionamento e quase não exige manutenção. Em função da baixa densidade energética das células fotovoltaicas, estas se adaptam melhor à geração distribuída do que à centralizada. (LORA e HADDAD, 2006).

Para realizar a conversão direta, são utilizadas células solares formadas por duas camadas de materiais semicondutores, uma positiva e outra negativa. Ao atingir a célula, os fótons, provenientes da radiação solar, excitam os elétrons, gerando eletricidade. Quanto maior a intensidade da radiação solar, maior o fluxo de eletricidade. (AMERICA DO SOL, 2014). Nesta conjuntura, as variações da potência produzida, devido à variação na intensidade solar, levam a prováveis flutuações na tensão gerada que, em condições particulares, podem interferir na qualidade da tensão. (FERREIRA *et al.*, -).

Com o propósito de converter energia solar em energia elétrica, os módulos fotovoltaicos, constituídos por um determinado número de células FV dispostas em associação em série, são fabricados de modo a atender determinadas normas. Estabelecido pelas normas E1036, (ASTM, 2002), IEC 61215/61646, (TÜV, 2003), a irradiância solar G deve ser de 1000 W/m^2 , temperatura de célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ para uma massa de ar AM 1,5. Através dessas condições é que são identificadas as características dos módulos, como a potência elétrica de pico.

Essas normas estabelecem também uma temperatura nominal de operação das células, denominadas de NOCT (*Nominal Operating Cells Temperature*), quando o módulo é submetido a uma irradiância de 800 W/m^2 a uma temperatura ambiente de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e velocidade do vento de 1 m/s , como é mostrado na Eq. 2.2. Um ponto importante a se considerar em um módulo fotovoltaico é a temperatura de funcionamento nas condições reais, pois segundo Okada (2005), considera que as reduções de desempenho dos módulos se devam a valores elevados de temperatura das células.

$$T_c = T_a + \left(\frac{T_{NOCT} - 20}{800} \right) G \quad (2.2)$$

onde T_c é a temperatura de célula e T_a temperatura ambiente.

Os módulos podem ser associados tanto em série quanto em paralelo. Quando se liga em série, o terminal positivo de um dos módulos é ligado ao terminal negativo do outro módulo, onde suas tensões são somadas, Eq. 2.3, enquanto que suas correntes permanecem as mesmas Eq. 2.4, considerando módulos com as mesmas especificações. A Figura 2.6 representa o comportamento de duas células FV associadas em série, comportamento que ocorre com a associação de módulos FV em série.

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (2.3)$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (2.4)$$

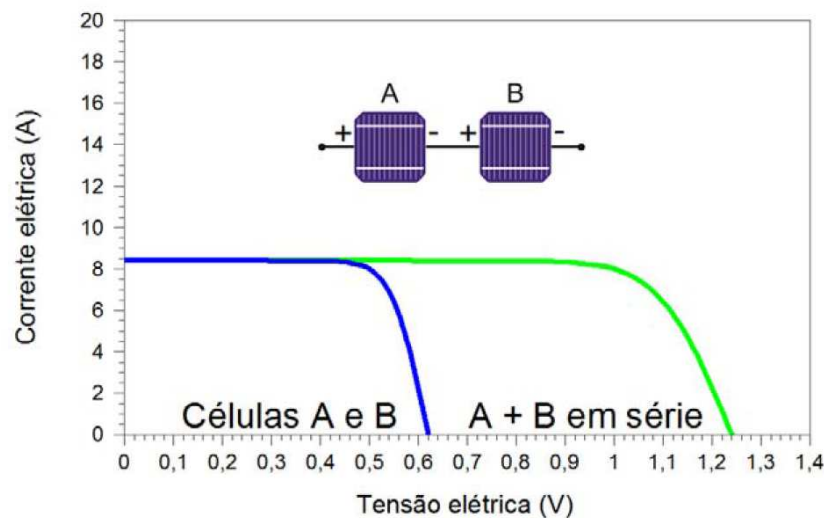


Figura 2.6 - Associação de duas células em série, e o mesmo que ocorre com os módulos FV
Fonte: CRESESB (2014)

Quando associados em paralelo, os terminais positivos de todos os módulos são ligados juntos, assim como todos os terminais negativos, de forma que a tensão do conjunto seja a mesma, Eq. 2.5, enquanto que as correntes são somadas, Eq. 2.6, conforme pode ser verificada na Fig. 2.7.

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (2.5)$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (2.6)$$

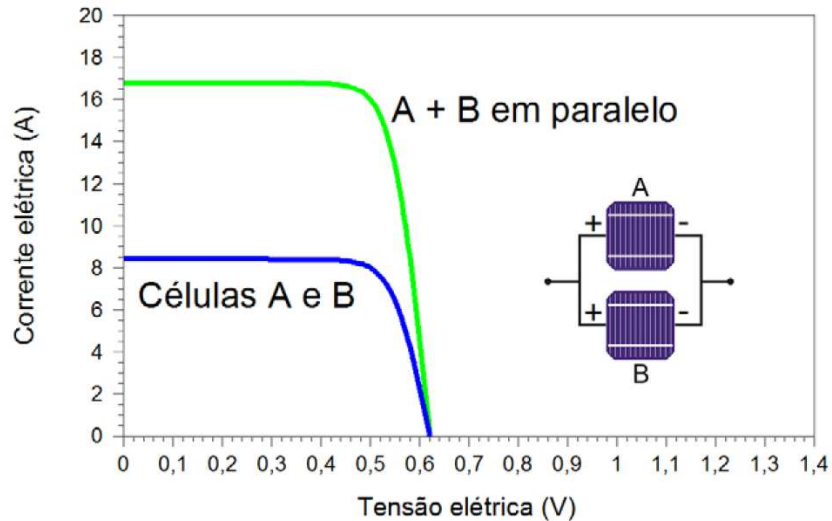


Figura 2.7 - Associação de duas células em paralelo, e o mesmo ocorre com os módulos FV.
Fonte: CRESESB (2014)

Quando se verifica a tensão de um módulo que está exposto à radiação solar, com o auxílio de um voltímetro, não estando o módulo conectado a nenhum outro equipamento, essa tensão é chamada de tensão de circuito aberto V_{oc} . Quando no mesmo módulo é colocado um amperímetro ligado em série com seus terminais, é verificada a corrente de curto-circuito I_{sc} .

2.5 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.5.1 Sistemas autônomos

Os sistemas fotovoltaicos autônomos ou sistemas fotovoltaicos isolados (SFI) são muito empregados em locais onde não há a disponibilidade de eletricidade oriunda de uma concessionária, sendo constituído basicamente por módulos fotovoltaicos, banco de baterias, regulador de carga e inversor de corrente contínua em corrente alternada, para suprir uma determinada carga, Fig. 2.8.

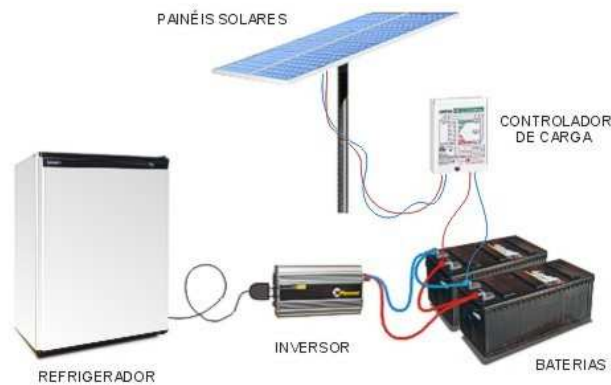


Figura 2.8 - Esquema típico de um sistema autônomo.
Fonte: (NET, 2014).

Quando se deseja utilizar aparelhos elétricos durante o período em que não há a geração de energia elétrica, é necessário um banco de armazenamento, que podem ser as baterias. Quando o sistema FV isolado for suprir uma única unidade consumidora (UC), ele é chamado de sistema FV isolado individual. Quando for para suprir um grupo de unidades consumidoras, é chamado de minirrede. Esses sistemas são regulamentados pela Aneel através da resolução N° 493/2012 (ANEEL, 2012), que estabelecem as normas e procedimentos que devem ser seguidos para Microssistemas Isolados e Individuais.

Para oferecer maiores possibilidades de uso dos SFI, a norma regulamentadora estabelece que os níveis de tensão da rede devam ser de 127 ou 220 Volts para sistemas mistos c.c./c.a. ou exclusivamente c.a. não permitindo a configuração c.c.

2.5.2 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR)

Diferentemente dos sistemas autônomos, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede necessitam obrigatoriamente de uma rede elétrica como referência, onde toda a energia elétrica produzida é injetada diretamente na rede elétrica não possuindo a priori um sistema de estocagem, (LOPEZ, 2012). São constituídos basicamente por módulos fotovoltaicos, ligados em série e, ou paralelo a fim de chegarem a um valor de tensão e corrente, que se adapte ao inversor, que transforma corrente contínua em corrente alternada, Fig. 2.9.

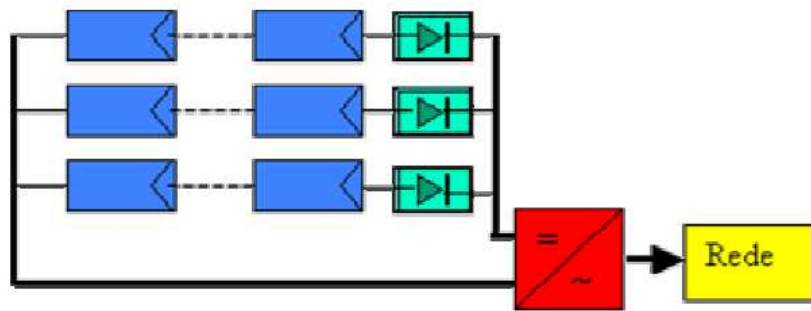


Figura 2.9 - Esquema básico de um SFCR com inversor central.
Fonte: (Dias, 2006).

A resolução regulamentadora da Aneel N°482/2012 estabelece as condições para sistemas de micro e minigeração distribuídas. Quando a instalação possuir uma potência instalada menor ou igual a 100 kW, é considerada um sistema de microgeração. Quando for maior de 100 kW e menor ou igual a 1 MW, é considerada minigeração.

Para a determinação do desempenho de um sistema FV conectado à rede elétrica, podem ser utilizados fatores baseados nos índices de mérito que estão de acordo com a Comunidade Econômica Europeia para sistemas conectados à rede elétrica *CEC – Joint Research Centre* (OLIVEIRA, 2002), que estabelecem alguns parâmetros a serem considerados. Tem-se como destaque a área útil do gerador FV A_{ger} , combinado com a irradiância G incidente nessa superfície, por um determinado tempo t . A energia produzida pelo gerador fotovoltaico E_{ger} é determinada conforme a Eq. 2.7.

$$E_{ger} = A_{ger} \int G(t) dt \quad (2.7)$$

Estando os módulos FV sobre a incidência de um determinado valor de irradiância, os mesmos produzem uma diferença de potencial V_{cc} , e estando conectado a um inversor c.c./c.a., formando um circuito fechado, é gerada uma corrente elétrica I_{cc} nesse circuito. O produto dessa tensão pela corrente dá uma potência elétrica contínua P_{cc} , Eq. 2.8.

$$P_{cc} = \int V_{cc}(t) I_{cc}(t) dt \quad (2.8)$$

A integração dos valores de potência P_{cc} por um determinado período de tempo fornece a energia em corrente contínua E_{cc} , Eq. 2.9.

$$E_{cc} = \int P_{cc}(t)dt \quad (2.9)$$

Da mesma forma em que é determinada a potência na entrada do inversor, é determinada a potência na saída. O produto da tensão alternada V_{ca} e a corrente alternada I_{ca} , por um determinado período de tempo fornece a potência elétrica alternada P_{ca} , Eq. 2.10. Integrando os valores de potência P_{ca} por um determinado período de tempo fornece a energia em corrente alternada E_{ca} , Eq. 2.11.

$$P_{ca} = \int V_{ca}(t)I_{ca}(t)dt \quad (2.10)$$

$$E_{ca} = \int P_{ca}(t)dt \quad (2.11)$$

Relacionando a energia injetada na rede elétrica E_{ca} com a energia gerada pelo painel FV, E_{ger} , pode ser determinada a eficiência global do sistema η_s , como pode ser verificada na Eq. 2.12.

$$\eta_s = \frac{E_{ca}}{E_{ger}} = \frac{\int P_{ca}(t)dt}{A_{ger} \int G(t)dt} \quad (2.12)$$

Já a capacidade dos inversores em transformar energia elétrica de tensão contínua E_{cc} em energia elétrica de tensão alternada E_{ca} , fornece a eficiência média do inversor η_{inv} , verificada na Eq. 2.13.

$$\eta_{inv} = \frac{E_{ca}}{E_{cc}} = \frac{\int P_{ca}(t)dt}{\int P_{cc}(t)dt} \quad (2.13)$$

2.6 SISTEMAS HÍBRIDOS

A disponibilidade de energia elétrica para determinadas regiões do país não é e nem será semelhante aos dos grandes centros urbanos, em função da inviabilidade para instalações em lugares remotos onde a demanda por energia elétrica é muito pequena além das grandes distâncias que acarretam em custo de transmissão elevados (LOPEZ, 2012). Para esses

lugares a melhor opção para geração de energia é através de sistemas híbridos que possibilitam uma maior flexibilidade em função da localização desses lugares remotos.

Mas o que vem a ser sistemas híbridos? Segundo Reis (2011), sistemas híbridos são uma importante maneira de integrar diferentes tipos de geração de energia descentralizada para demanda em regiões isoladas.

Nesse contexto podem-se destacar os sistemas fotovoltaicos, sistemas eólicos, sistemas de geradores diesel/biodiesel, biomassa entre outros. Dentro desses sistemas podem ser formadas diferentes topologias de trabalho.

Solar - Diesel e Eólico - Diesel: dentro desse modelo, a ideia é a combinação de um determinado tipo de combustível, como a biomassa, gás natural, a gasolina, o biodiesel e o próprio diesel, mais utilizado, com a energia eólica e ou solar fotovoltaica.

Solar - Eólico: nessa topologia, a ideia é a complementação dessas formas de energia, sendo para regiões onde a disponibilidade primária é cíclica, onde pouco vento e muito sol durante o dia e vento durante a noite.

Diesel - Eólico - Solar: a junção desses três tipos de fontes energéticas está na busca por uma produção de energia elétrica com um determinado grau de segurança, onde não pode haver a falta de energia elétrica, podendo atender a cargas maiores, como sistemas de refrigeração e aquecimento.

Biogás - Eólico - Solar: a utilização do biogás, oriunda da decomposição de dejetos orgânicos, está servindo como recurso para pequenos produtores rurais que antes não tinham o que fazer com esse material que era jogado fora e que agora está servindo como fonte energética.

LOPEZ (2012) cita pequenas regiões da Amazônia nos quais é utilizado sistema híbrido fotovoltaico-diesel, onde prestadoras disponibilizam esse serviço a um custo elevado, e o consumidor paga um subsídio de até 100 % no valor do diesel, caso exceda a demanda que foi contratada.

Essas prestadoras de serviço chegam a ocupar 45% da região amazônica, fornecendo somente 3% de energia para a população. Se esse percentual de energia produzida através de geradores a diesel, que chega à casa dos 620 MWh, fosse gerado por sistemas fotovoltaicos, estima-se que o custo fosse menor, em função do valor do diesel em si, acrescido do frete para essas regiões.

2.6.1 Estudos relacionados aos sistemas FV e gerenciamento

O monitoramento e a análise de um sistema híbrido eólico – diesel realizado pelo Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE), no Belém do Pará, através de (S.B. VALE, ET AL.) mostra o comportamento de um sistema híbrido na comunidade de Praia Grande, as margens da Ilha de Marajó.

O sistema é formado por um conjunto eólico de 7,5 kW e 15 kW de geração diesel, com sistema de estocagem de 3,6 kWh, suprimindo uma rede elétrica monofásica de 1600 m. Os pesquisadores ressaltam a baixa produtividade dos aerogeradores em função das baixas velocidades dos ventos, fazendo que os conjuntos atinjam 15 % de sua capacidade de produção.

Destaca-se para essa região a possibilidade do uso da energia solar fotovoltaica, onde a irradiância média anual fica na faixa dos 300 W/m².

Já o Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do IEE/USP, através de (MOCELIN e ZILLES, 2012) vem estudando as minirredes através de alimentação híbrida, composta por módulos fotovoltaicos, banco de baterias e gerador a diesel. O intuito do estudo é avaliar diferentes condições de funcionamento, identificando quais apresentam maiores vantagens e desvantagens. Por se tratar de uma unidade de capacitação, eles enfocam na falta de mão de obra especializada para esse setor, assim como instituições que ofereçam cursos de capacitação.

Já o trabalho de Aramizu (2010) destaca a análise do modelamento de um sistema formado por dois sistemas fotovoltaicos, um isolado e outro conectado à rede, no qual suprem a demanda de uma determinada carga. Esse modelamento foi feito na plataforma do Matlab, onde foram alterados parâmetros como temperatura ambiente e irradiância para verificar o comportamento das grandezas elétricas que atuam sobre a carga, sendo verificado que essas variações afetam diretamente os valores de tensão e corrente elétricas, não influenciando a produção de harmônicas, que também contemplava o estudo, onde eram afetados pela variação do chaveamento do inversor.

De Paula (2013) apresenta o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento eletrônico, chamado de medidor eletrônico, para verificar a demanda do consumo de energia elétrica residencial, podendo esse gerenciamento ser feito remotamente através da internet. Seu sistema é composto por um circuito microcontrolado e por sensores de tensão e corrente, fornecendo as variáveis necessárias para a análise de seu estudo, que tem como principal foco

mostrar para o consumidor em tempo real como está seu consumo para que ele possa agir proativamente na redução do consumo.

Em seu trabalho, Teixeira (2009) desenvolveu um medidor de energia eletrônico microcontrolado, que tem por função a coleta de sinais de tensão e corrente elétricas de uma determinada instalação, com a premissa de estipular a potência consumida, tanto a ativa quanto a reativa. Complementando o estudo, o sistema de medição determina o fator de potência assim como atua no sistema acionando um banco de capacitor de modo a deixar o sistema de acordo com as normas.

A visualização dos dados se dá através de um display de LCD além de um relatório com todas as variáveis envolvidas no processo que podem ser acessadas através de um computador com comunicação serial RS232.

Aissou (2015) trata em seu estudo de um modelo de controle para um sistema híbrido com estocagem formado por painéis FV e turbina eólica e baterias. O sistema é modelado e simulado na plataforma Matlab/Simulink. A introdução do controle de potência é feita utilizando o software LabVIEW. O sistema é composto por seis módulos de 175 W ligados em paralelo, juntamente com uma turbina eólica de 1 kW, banco de estocagem de energia, inversor e sensores de irradiância, temperatura, tensão e corrente. As informações dos sensores são enviadas para o sistema de aquisição de dados que conectado ao LabVIEW fornece em tempo real as condições do sistema.

Como análise, são verificadas as estabilidades das tensões e correntes envolvidas no processo a fim de viabilizar o estudo dos fluxos de energias de cada componente do sistema para suprir a demanda de uma determinada carga.

Arul (2015) traz em seu trabalho uma revisão das estratégias de controle para sistemas híbridos isolados e conectados à rede elétrica com o propósito de suprir cargas conectadas em tensão alternada. Apresenta várias topologias utilizadas, como os sistemas de geração, fotovoltaica, eólica e estocagem, ligados a um barramento de corrente contínua que se conecta a um inversor c.c./c.a. para posteriormente se conectar à rede da concessionária.

Ilustra as topologias para sistemas de geração trifásicos e bifásicos que podem suprir demandas de cargas que também podem ser trifásicas ou bifásicas, com inversores conectados em paralelo ao barramento principal de corrente alternada. Traz a possibilidade de conexões ao barramento mostrando as estratégias de controle.

Como resultados apontam para as conexões com barramento principal em corrente alternada, pois se reduz o número de estágios de conversão de c.c./c.a. assim como a redução nas perdas durante as transferências de potências dos equipamentos. Destaca-se também a

importância das estratégias de controle para aumentar a eficiência do sistema, assim como a estabilidade e a qualidade da geração.

2.7 BANCO DE ESTOCAGEM

2.7.1 Baterias

Por volta de 1800, após sobrepor chapas de zinco e prata, separadas por um disco de feltro embebido em ácido sulfúrico, Alessandro Volta descobriu o que hoje é conhecido como pilha. Volta empilhou 30 conjuntos desses discos e quando aproximaram dois condutores, um ligado a base e outro ao topo do conjunto, observou uma centelha saindo entre os mesmos, BBC (2012).

Assim se deu o ponto de partida na pesquisa por fontes de corrente contínua, denominadas de células galvânicas primárias. E esse desenvolvimento vem crescendo até os dias atuais, sendo que a partir de 1886, foi descoberto que as baterias de chumbo ácido eram mais eficientes e começaram a ganhar maior gama de aplicações CHAGAS (2007).

Com a associação em série e em paralelo dessas baterias, conseguem-se valores de tensão e correntes desejadas, formando bancos autônomos de energia, onde nos mesmos sempre terá dois polos, um positivo (ânodo) e um negativo (cátodo), por onde circula a corrente elétrica, DAROS (2013).

Da mesma forma que nos módulos FV, a tensão gerada pelo banco de baterias é contínua, e estando o mesmo formando um circuito fechado gera também uma corrente contínua, podendo assim ser verificada a potência elétrica fornecida pelo banco de baterias.

Para a análise do banco de baterias algumas situações são controladas, a corrente de carga, a corrente de descarga e o SOC (*State of Charge* – ou estado da carga), que é um fator que determina a quantidade de carga da bateria em relação a sua capacidade máxima de armazenamento, (BASTOS, 2013).

Para a análise do estado de carga do banco de baterias SOC, Eq. 2.14, alguns parâmetros devem ser considerados, sendo a tensão em circuito aberto $V(t_0)$, a corrente máxima $i(t)$ suportada pela bateria, a energia que flui de dentro para fora ou de fora para dentro da bateria e a capacidade máxima de armazenamento, além da constante de eficiência de carga, α_{carga} , que é inversamente proporcional a corrente drenada pelo sistema.

$$SOC(t) = \frac{V(t_0) + \int_0^t \alpha_{carga} i(t) dt}{Capacidade\ Máxima} 100\% \quad (2.14)$$

Dentre vários métodos de cargas estudados, o método de carga a corrente constante, garante tanto cargas parciais quanto cargas completas, favorecendo para uma temperatura menor de trabalho das baterias, característica essa muito importante para a vida útil das mesmas, (COELHO, 2001).

Com o monitoramento de tensão e corrente do banco de baterias, é possível determinar o momento em que devem parar os processos de carga e de descarga, para aumentar a vida útil das mesmas. Este processo não é linear, como pode ser visto na Tab. 2.1, para uma bateria de 12 V.

Tabela 2.1- Tensões nos terminais da bateria em função da descarga.
Fonte: Coelho (2001)

Porcentagem de Descarga	Tensão sobre os terminais (V)
1%	12,91
10%	12,80
20%	12,66
30%	12,52
40%	12,38
50%	12,22
60%	12,06
70%	11,90
80%	11,70
90%	11,42
100%	10,50

Sendo assim, o banco de baterias deve ter uma capacidade de suprir a demanda por um determinado número de dias N_{dia} , para um valor de consumo médio diário B_{dia} , podendo assim ser calculado a capacidade útil C_u do banco de estocagem, como pode ser visto na Eq. 2.15.

$$C_u = N_{dia} B_{dia} \quad (2.15)$$

Para prolongar a vida útil do banco de estocagem, é importante que um percentual de energia permaneça na mesma, pois a bateria não deve ser completamente descarregada,

podendo ser danificada. Quanto menos energia tiver na bateria antes da recarga, menor será a sua vida útil. Este princípio é nomeado como profundidade de descarga, e pode ser apresentado conforme a Eq. 2.16, sendo P_d a profundidade de descarga e E_{ch} a fração de energia existente na bateria.

$$P_d = 1 - E_{ch} \quad (2.16)$$

Para preservar a vida útil das baterias, são considerados normais profundidades de descarga de 0,7 e 0,8. Aliados a isso existe um fator indicado pelo fabricante que é o coeficiente redutor por temperatura R_t , que determina a influência da temperatura na vida útil da bateria. Com esses parâmetros pode-se determinar a capacidade nominal da bateria, C_{20} , que é calculada para uma descarga de 20 h, conforme a Eq. 2.17.

$$C_{20} = \frac{C_u}{P_d R_t} \quad (2.17)$$

2.7.1.1 Baterias de chumbo - ácido

Dentre os tipos de baterias de chumbo-ácido existentes, podem-se destacar as baterias ventiladas (FVLA, do inglês *Free Vented Lead Acid*) e as baterias reguladas por válvulas (VRLA, do inglês *Valve Regulated Lead Acid*), sendo que qualquer um dos modelos pode ser feito associação em série e paralelo e formarem um banco de baterias.

Uma das baterias mais viáveis economicamente e conhecida por muitas pessoas, por ser uma de suas características o enchimento com água, é a do tipo FVLA, entretanto deve-se ter cuidado com o local onde são instaladas, pois elas emitem gases oriundos da liberação do hidrogênio durante seu funcionamento (CHAGAS, 2007).

Dependendo da temperatura de armazenamento, essas baterias podem durar até 8 anos para uma profundidade de descarga de até 50 %, (COPETTI e MACAGNAN, 2007), sendo que o fim da vida útil é considerado quando a carga atingir 80 % da capacidade nominal informada pelo fabricante. A Fig. 2.10 mostra um modelo de bateria de chumbo-ácido.

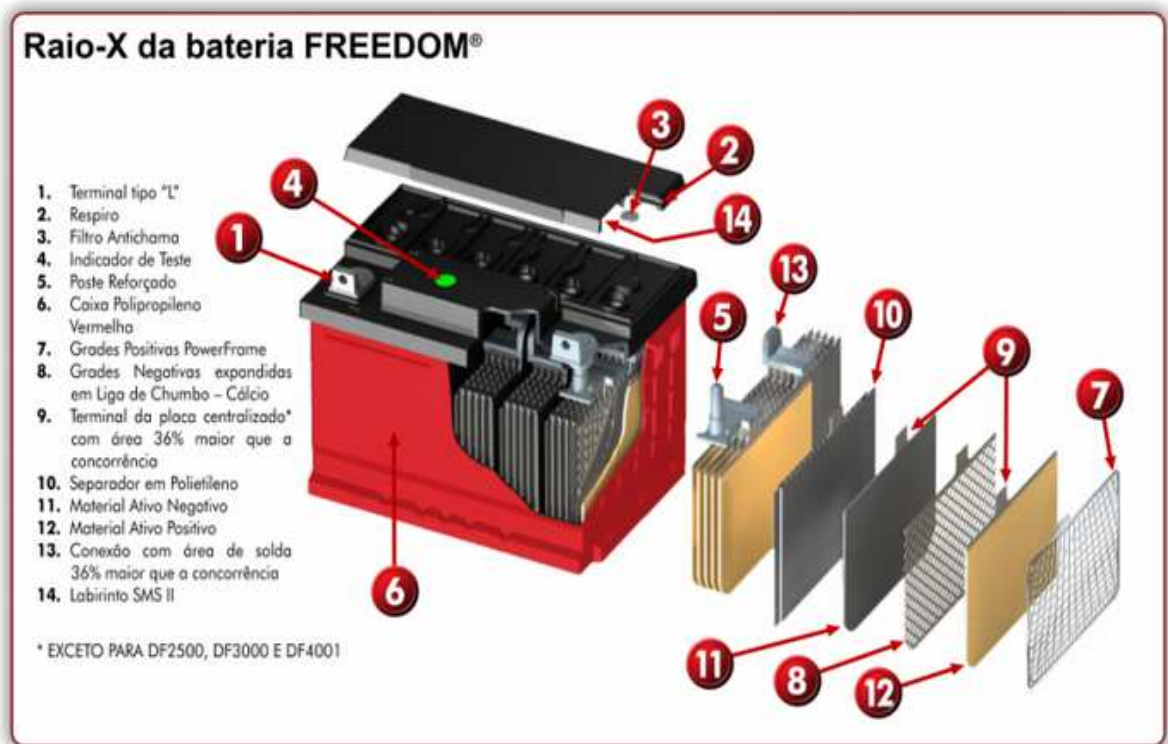


Figura 2.10 - Modelo de uma bateria chumbo-ácido.
Fonte: (NEO SOLAR ENERGIA).

2.8 INVERSORES

Os inversores são dispositivos eletroeletrônicos que tem por função a conversão de corrente contínua (c.c.) em corrente alternada (c.a.). Para isso necessitam de uma fonte que podem ser de banco de estocagem de energia, módulos FV entre outros.

A tensão de saída dos inversores deve possuir uma determinada frequência e amplitude, e a amplitude é em função dos equipamentos que fazem parte do sistema. Dentre os modelos de inversores, os conectados à rede elétrica possuem como característica a sincronização com a rede na qual estão conectadas, sendo que só funcionam se tiverem uma rede elétrica como referência.

Para sistemas fotovoltaicos, os inversores podem ser divididos em relação ao tipo de aplicação, como os SFIs (Sistemas FV Isolados) e os SFCRs (Sistemas FV Conectados à Rede), ambos possuindo os mesmos princípios de funcionamento, mas com características específicas para os SFCRs por exigências das concessionárias para conexão. Dependendo do tipo de aplicação suas saídas podem ser monofásicas ou trifásicas, com chaveamento eletrônico através da eletrônica de potência.

2.9 CONTROLADORES DE CARGA

Todos os sistemas fotovoltaicos isolados necessitam armazenar energia para ser usada em momentos em que o sol não está aparente no céu, assim o uso de baterias para formar o banco de estocagem é utilizado. Para que o banco de estocagem de energia tenha uma boa produtividade e vida útil, é necessário o uso de controladores de carga, que possui a função de proteger e fazer o gerenciamento dos processos de carga e descarga dos bancos de estocagem.

O controlador de carga é um componente muito importante em um sistema FV isolado, pois caso venha a falhar pode causar danos ao banco de estocagem. Deve ser utilizado de acordo com o tipo de bateria que é formado o banco de estocagem para aumentar o rendimento do sistema.

Os controladores de carga devem fazer a redução da corrente oriunda dos painéis FV quando o banco de estocagem estiver completamente carregado, assim como não permitir uma longa profundidade de descarga do conjunto. Os controladores podem ser classificados como paralelo ou série.

O controlador paralelo possui um sistema de chaveamento interno, como relé ou dispositivo semicondutor que desliga ou reduz o fluxo de corrente elétrica do gerador FV para o banco de estocagem. Esse dispositivo fica ligado paralelamente ao banco de estocagem deixando passar apenas a quantidade de energia necessária para o sistema, de acordo com a tensão do sistema, sendo necessário o uso de um diodo de proteção. Esse diodo é colocado em série com o fluxo de corrente, servindo de proteção para o sistema FV, impedindo fluxo de corrente reversa no período da noite.

Já o controlador série possui também um sistema de chaveamento, mas ligado em série com o fluxo de corrente e serve para sistemas com tensões mais baixas não necessitando do diodo de proteção. Além desses tipos de controladores, existem os controladores do tipo liga/desliga (on/off), que aplicam diretamente a tensão e a corrente do gerador fotovoltaico no banco de estocagem sem haver nenhum controle. Esse tipo de controlador monitora a tensão instantânea do banco de estocagem, e quando atingir um determinado valor desconecta o gerador FV.

Segundo o Manual de Engenharia FV da GRESESB, o limite superior de tensão por célula da bateria fica entre 2,3 a 2,5 V, enquanto o limite inferior fica entre 1,9 a 2,1 V. A corrente máxima suportada pelo controlador deve ter o fator de multiplicação 1,25 da corrente de curto circuito do gerador FV e tensões de 12 V, 24 V ou 48 V de acordo com a necessidade do banco de estocagem de energia.

O manual destaca ainda algumas outras especificações importantes dos controladores de carga, como:

- Estratégias de controle através do PWM (Pulse Width Modulation);
- Proteção contra sobre tensões na entrada do controlador;
- Proteção contra curto-circuito na saída para a carga;
- Seguimento do ponto de máxima potência do gerador FV;
- Pontos de regulagens ajustáveis;
- Alarmes e indicadores visuais;
- Outros;

2.10 SISTEMA SUPERVISÓRIO

Um sistema de supervisão com aquisição de dados, conhecido na indústria como SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), ou basicamente software supervísório, são softwares desenvolvidos para o monitoramento parcial ou total de um determinado sistema através de placas de aquisição de dados e controladores específicos interligados a um computador que mostra em tempo real as condições do sistema.

Segundo Tibola (2000), são sistemas desenvolvidos para que haja a interação homem máquina, de forma a mostrar através de telas gráficas e ou alarmes quais as ações que o operador deve tomar, e executar determinadas ações para a segurança de todos e do sistema. Esses sistemas podem executar determinadas ações em funções de parâmetros pré-estabelecidos anteriormente. Esses sistemas podem coletar dados e armazená-los em banco de dados de modo a gerarem históricos, que dependendo da empresa, pode integrar esses dados a outros softwares de gerenciamento tanto financeiro quando de manutenção.

Existem no mercado vários fabricantes de componentes eletroeletrônicos que disponibilizam seus próprios softwares supervísórios para que seus clientes possam montar seus sistemas de controle, mas isso faz com que o cliente fique restrito a um determinado fabricante. Uma das características importantes de um sistema supervísório é a não necessidade do deslocamento de pessoas para a verificação de variáveis importantes num determinado processo de fabricação dentro da fábrica.

Todas as informações relevantes estão a todo o momento sendo atualizadas na tela de um computador, informações de sensores são enviadas para os CLP's (Controladores Lógicos Programáveis) que estão se comunicando com o software supervísório como mostra a Fig.

2.11. As informações que são enviadas estão associadas a determinados componentes do sistema supervísório, chamados *Tags*, que são variáveis que podem ser numéricas ou alfanuméricas que fazem parte do processo analisado.

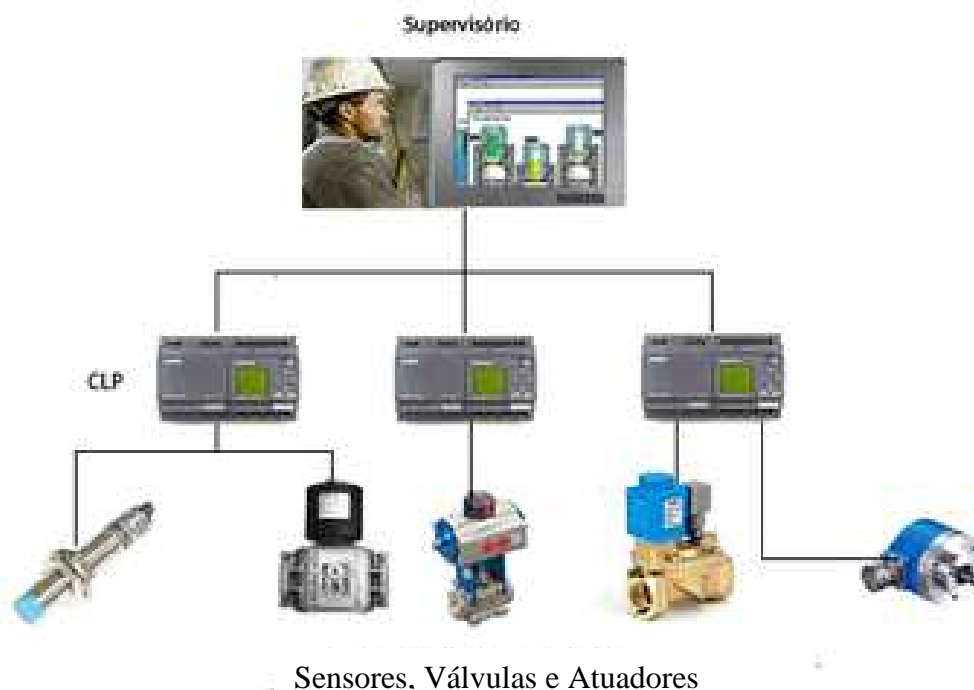


Figura 2.11 - Esquemática de um sistema Supervisório.
Fonte: (MECATRON).

Nível de um tanque, temperatura de operação de um fluido, pressão em um sistema hidráulico, podem ser exemplos reais para o qual uma *Tag* pode ser associada. Assim podem ser feitas lógicas de controle para otimização de um processo. Tibola (2000) destaca ainda os métodos de visualização das *Tags*, que normalmente são apresentadas em tempo real e através de gráficos de tendência, possibilitando o operador ter uma real visão do comportamento das variáveis utilizadas.

Destaca de forma simplificada os componentes físicos que podem fazer parte do sistema SCADA como os sensores responsáveis por fazer a conversão dos fenômenos físicos em sinais analógicos para que o sistema possa interpretá-los, redes de comunicação por onde a informação dos sensores e atuadores circula até os controladores e estações de monitoramento. Todos esses dados podem ser armazenados em um banco de dados permitindo que o usuário possa recuperá-los de forma rápida e segura possibilitando a geração de relatórios para controle estatístico dos mais diversos processos.

A estrutura física de um sistema de supervisão pode ser dividida em três seções. A primeira é onde estão alocados os equipamentos atuadores, como motores, sensores que possuem como característica uma comunicação específica com os CLP's, através de protocolos de comunicação. A segunda seção refere-se à comunicação dos Controladores Lógicos Programáveis com os computadores que estão executando o supervisório, comumente feita através da comunicação serial, com a utilização de drives específicos para cada tipo de equipamento. A última seção destina-se a conexão do sistema supervisório com demais setores da empresa, como área administrativa, controle de estoque, entre outros, possibilitando que um grande número de pessoas possa ter acesso aos dados para traçarem estratégias afins ao seu setor.

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo é apresentada a relação dos materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da microrrede isolada/conectada com estocagem, sendo dividida em três partes: geração, aquisição e controle. Dentro da parte de geração destacam-se a estrutura de instalação, módulos fotovoltaicos, inversores c.c./c.a., regulador de carga, banco de estocagem de energia e dispositivo contra sobre tensão.

Na parte de aquisição, destacam-se o microcontrolador da plataforma Arduino, sensores de corrente ACS712, sensores de tensão, relógio de tempo real RTC, *Shield SDCard*, relé de comutação, sensor de radiação solar e sensores de temperatura. Na parte de controle são apresentadas as lógicas dos programas desenvolvidos para o gerenciamento da microrrede assim como as variáveis utilizadas.

3.1 SISTEMA DE GERAÇÃO

3.1.1 Descrição da Instalação

A microrrede está instalada no Laboratório de Energias Renováveis da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS, situada na cidade de São Leopoldo. É composta por dois modelos de módulos fotovoltaicos, dois modelos de inversores c.c./c.a., controlador de carga e duas baterias que formam o banco de estocagem de energia e sistema de aquisição de dados.

A Figura 3.1 apresenta a configuração em que a microrrede é constituída, apresentando os elementos de geração, posição dos sensores de corrente e disjuntores.

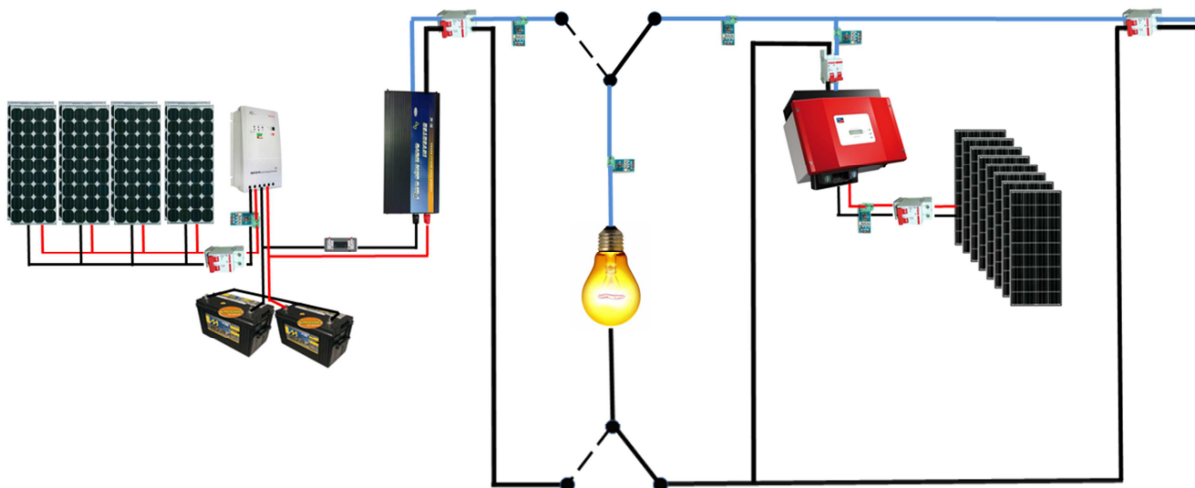


Figura 3.1 - Topologia da microrrede FV isolada/conectada.

São utilizados 16 módulos fotovoltaicos. A ligação de oito módulos forma um dos painéis fotovoltaicos que está com ângulo de inclinação β , em relação ao plano horizontal de 30° e ângulo azimutal, γ_s , de 180° . Os outros 8 módulos também estão com ângulo azimutal, γ_s , 180° , mas possibilita o ajuste de inclinação dos módulos, como mostrado na Fig. 3.2.



Figura 3.2- Painéis FV com duas tecnologias de módulos FV, silício mono e multicristalino.

3.1.2 Módulos Fotovoltaicos

O painel FV superior, visto na Fig. 3.2, é composto por módulos fotovoltaicos modelo KD135SX-UPU da Kyocera representado na Fig. 3.3. Tal módulo é composto por 36 células de silício multicristalino associadas em série. Sua potência nominal, estando na condição padrão de teste (1000 W/m^2 a 25°C e AM 1,5) é de 135 W.



Figura 3.3 - Módulo Kyocera modelo KD135SX-UPU.
Fonte: KYOCERA CORPORATION

A ligação desses 8 módulos forma o painel fotovoltaico que está ligado ao inversor *Sunny Boy 1200*. Os módulos são ligados em série, conforme mostra a Fig. 3.4, de modo a gerar uma potência máxima, na condição padrão de teste, de 1080 W, onde I_{FV_con} corresponde a corrente elétrica que sai do painel FV, enquanto que V_{FV_con} representa a tensão do painel.

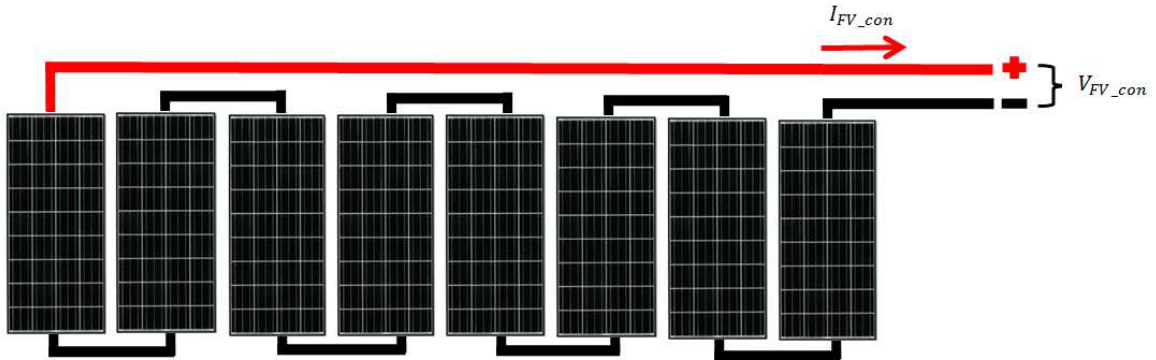


Figura 3.4 – Painel fotovoltaico com 8 módulos multicristalino ligados em série.

Nessa configuração e na condição padrão de teste, esse painel pode fornecer uma corrente elétrica de 7,63 A, como pode ser verificado na Tabela 3.1. Nesta configuração o painel gera uma tensão 160 V, estando dentro das especificações da entrada do inversor.

Tabela 3.1 - Valores do módulo na condição padrão de teste.

Condições Padrão de Teste	
Máxima Potência	135 Wp \pm 5%
Tensão Máxima do Sistema	600 V
Tensão do Ponto Máx. Pot. [Vmpp]	17,7 V
Corrente do Ponto Máx. Pot. [Impp]	7,63 A
Tensão de Circuito Aberto [Voc]	22,1 V
Corrente de Circuito Aberto [Isc]	8,37 A
Coefficiente de Temperatura [Voc]	$-8 \times 10^{-2} V/^{\circ}C$
Coefficiente de Temperatura [Isc]	$5,02 \times 10^{-3} A/^{\circ}C$
NOCT	47,9 $^{\circ}C$

Já o módulo SP75 da Siemens, mostrado na Fig. 3.5, é de silício monocristalino composto de 36 células que pode gerar uma potência de 75 W na condição padrão de teste. Quatro conjuntos ligados em paralelo de 2 módulos que estão ligados em série formam o painel fotovoltaico, que está ligado ao inversor do sistema isolado, gerando uma potência de 600 W.



Figura 3.5 - Módulo fotovoltaico Siemens Modelo SP75.
Fonte: SIEMENS SOLAR GMBH.

Estando nessa configuração mista, conforme mostra a Fig. 3.6, esse painel pode gerar uma corrente total I_{FV_iso} de até 17,6 A e uma tensão V_{FV_iso} de até 40 V, considerando a condição padrão de teste para o módulo, mostradas na Tabela 3.2. As correntes elétricas I_1 a I_4 são as correntes de cada arranjo do painel FV.

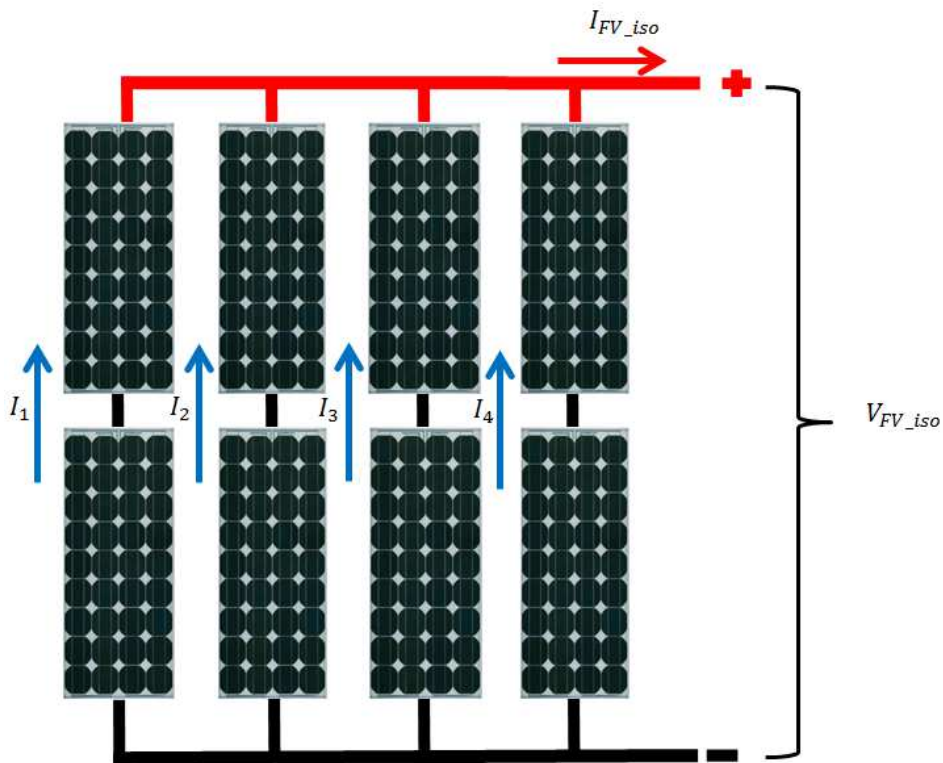


Figura 3.6 - Configuração do painel fotovoltaico com 8 módulos monocristalinos.

Tabela 3.2 - Condição padrão de teste do módulo SP75

Condições Padrão de Teste	
Máxima Potência	75 Wp
Tensão Máxima do Sistema	600 V
Tensão do Ponto Máx. Pot. [Vmpp]	17,0 V
Corrente do Ponto Máx. Pot. [Impp]	4,4 A
Tensão de Circuito Aberto [Voc]	21,7 V
Corrente de Circuito Aberto [Isc]	4,8 A
Coeficiente de Temperatura [Voc]	$-77 \times 10^{-3} \text{ V}/^{\circ}\text{C}$
Coeficiente de Temperatura [Isc]	$2,06 \times 10^{-3} \text{ A}/^{\circ}\text{C}$
NOCT	$45 \pm 2^{\circ}\text{C}$

3.1.3 Inversores c.c./c.a.

O inversor c.c./c.a. modelo *Sunny Boy 1200*, conforme Fig. 3.7, foi utilizado para fazer a conversão da corrente contínua produzida pelo painel fotovoltaico de silício multicristalino em corrente alternada. Esse inversor tem como característica a conexão com a rede elétrica. Para que ocorra essa conexão, o inversor faz alguns testes de forma automática como a verificação da frequência da rede elétrica, tensão, sincronismo e verifica a impedância da mesma.



Figura 3.7 - Inversor Sunny Boy 1200.
Fonte: SMA SOLAR TECHNOLOGY AG

Por ser um inversor que se conecta à rede elétrica, deve seguir algumas normas de segurança, como a NBR 5410 (1990), que estabelece alguns tipos de proteções contra choques ou acidentes envolvendo instalações de baixa tensão. Para que não ocorram acidentes com os operadores que trabalham na rede, esse inversor possui um sistema de segurança que fica monitorando a rede elétrica, caso ocorra falta de tensão de referência ele se desconecta em 0,2 segundos aproximadamente para evitar o fenômeno chamado de *Islanding* (formação de ilhas).

Seguem algumas características elétricas deste inversor.

- Tensão máxima de entrada em corrente contínua, $V_{ccmax} = 400 \text{ V}$
- Potência máxima de entrada em corrente contínua, $P_{ccmax} = 1320 \text{ W}$
- Faixa de tensão MPPT, $V_{cc} = 100 \text{ V}$ a 320 V
- Tensão nominal em corrente contínua, $V_{nom} = 120 \text{ V}$
- Corrente elétrica máxima da entrada em corrente contínua, $I_{ccmax} = 12,6 \text{ A}$
- Potência de saída em corrente alternada, $P_{camax} = 1200 \text{ W}$
- Tensão nominal de conexão em corrente alternada 220 V (180 a 265 V)
- Frequência de saída, 60 Hz
- Eficiência do inversor, $\eta_{inv} = 92,10 \%$

O Inversor Senoidal Puro modelo SP05, mostrado na Fig. 3.8, assim como o *Sunny Boy 1200* também converte corrente contínua em corrente alternada. É utilizado para produção de energia elétrica, mas não pode se conectar à rede elétrica da concessionária. Sua entrada está conectada paralelamente ao banco de estocagem de energia e ao controlador de carga, que conectados ao painel fotovoltaico de silício monocristalino formam a rede isolada da microrrede.



Figura 3.8 - Inversor Senoidal Puro 1000 W/ 24V.

Fonte: Adaptado pelo autor.

Como sistema de segurança, esse inversor possui proteção contra sobre carga, sobre tensão, baixa tensão, curto circuito e aquecimento.

Segue algumas características elétricas deste inversor.

- Potência nominal de saída em corrente alternada, $P_{\text{canom}} = 1000 \text{ W}$
- Tensão nominal de saída em corrente alternada de $V_{\text{nom}} = 220 \text{ V} \pm 10 \%$
- Distorção harmônica total $\leq 3 \%$
- Tensão de entrada em corrente contínua de 24 V
- Eficiência $\eta_{\text{inv}} = 90 \%$ para 24 V na entrada

3.1.4 Controlador de Carga

O controlador de carga modelo MPPT Tracer-3215RN, conforme mostra a Fig. 3.9, é utilizado para fazer o gerenciamento do processo de carga e descarga do banco de estocagem. Esse controlador possui sistema de rastreamento do ponto de máxima potência para painéis fotovoltaicos através de gerenciamento PWM (*Power Width Modulation*).



Figura 3.9 - Controlador de carga MPPT – Trace-3215RN.
Fonte: EP Solar.

Esse equipamento foi desenvolvido para operar com tensão de entrada de até 150 V proveniente do painel FV, e uma corrente máxima de carga e descarga de 20 A e 30 A respectivamente. O painel fotovoltaico instalado pode gerar até 780 W para uma tensão de

banco de 24 V e 390 W para um banco de estocagem de 12 V. Ele realiza o carregamento de baterias de chumbo-ácido seladas, gel e abertas e possui sensor de temperatura para otimizar a vida útil do banco de estocagem.

Na microrrede, o controlador de carga está trabalhando com um banco de estocagem com tensão de 24 V e 600 W de potência de painel FV.

3.1.5 Banco de Estocagem de Energia

O banco de estocagem de energia, como mostra a Fig. 3.10 é formado por duas baterias de 12 V / 100 Ah associadas em série de modo a formar um banco de 24 V com capacidade nominal de 100 Ah.

O banco é formado por baterias seladas de Chumbo-ácido que são utilizadas por não necessitarem de nenhum tipo de manutenção. O controle de corrente de carga é feito através do controlador de carga no qual o banco está ligado. A tensão de circuito aberto do banco chega a 28,8 V. A tensão mínima do banco é de 21 V, quando a profundidade de descarga é considerada de 100 %.

Para prolongar a vida útil do banco de estocagem, o software supervisor que fica controlando a tensão do banco possibilita uma profundidade de descarga de 50 %, assim aumenta-se o número de ciclos para a bateria de chumbo-ácido.



Figura 3.10 - Banco de estocagem de 24 V/100 Ah.

3.1.6 Dispositivos de Proteção Contra Surtos - DPS

Os DPS's destinados a proteção dos circuitos elétricos contra descargas atmosféricas é o modelo DPS25275 da marca Steck. Este componente pode efetuar a proteção do circuito em tempos muito baixos, na ordem dos 25 ns, para uma descarga de até 25 kA de corrente elétrica. Trabalha com tensões alternadas de até 275 V e com tensão contínua de 350 V. Estão instalados tanto no condutor fase quanto no condutor neutro da carga.

3.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO

O sistema de controle da microrrede fica dentro de um quadro elétrico onde estão dispostos os componentes necessários para o processo de aquisição de dados. Os componentes que fazem parte da geração, mostrados na Fig. 3.11, como inversores e regulador de tensão estão próximos ao quadro facilitando o acesso aos mesmos.

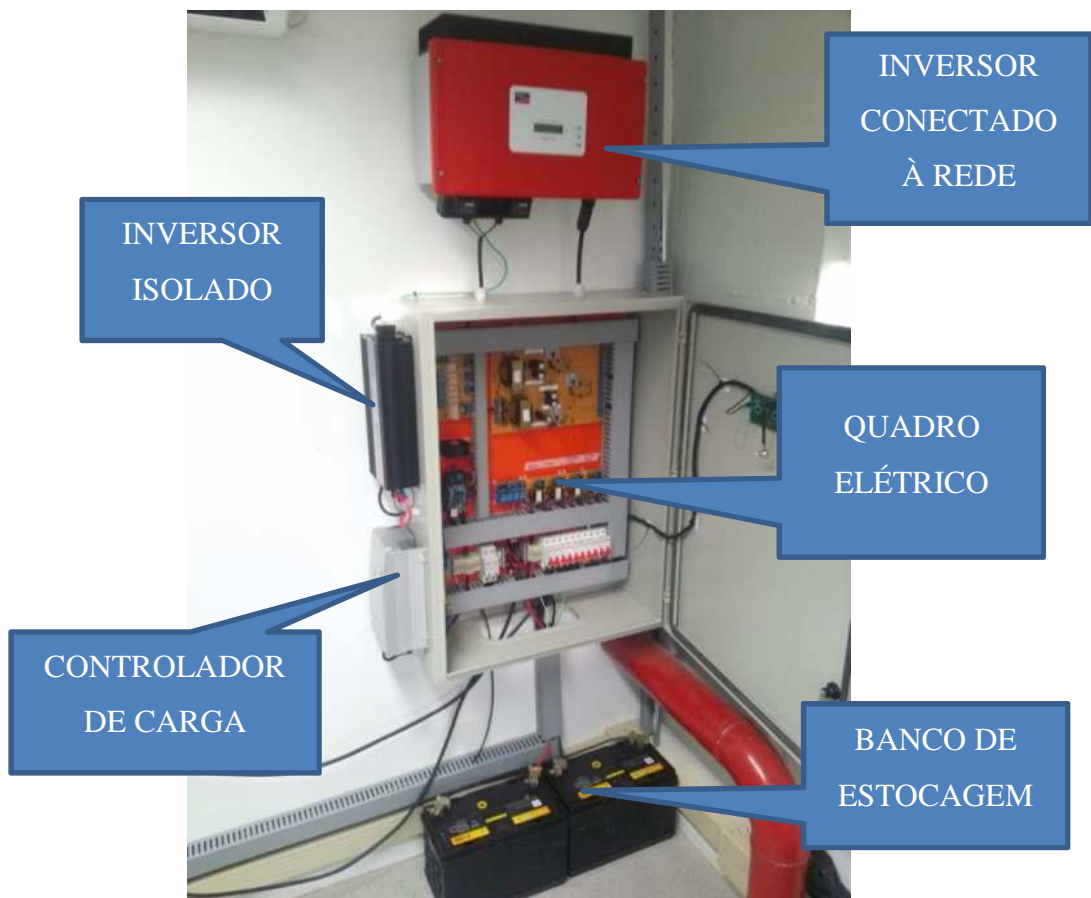


Figura 3.11 - Quadro com sistema de aquisição de dados.

Dentro do quadro estão os sensores de corrente, sensores de tensão, fonte de alimentação, placa micro controlada, além dos dispositivos de segurança como disjuntores e protetores de surtos. Na porta do quadro elétrico está instalado um display de cristal líquido que fornece as informações em tempo real das variáveis envolvidas no processo.

3.2.1 Descrição dos Componentes de Controle

A topologia utilizada entre sensores e a plataforma Arduino pode ser verificada na Fig. 3.12, assim como a lógica dos sentidos dos dados entre os componentes.



Figura 3.12 - Topologia utilizada para controle da microrrede.

3.2.1.1 Plataforma de desenvolvimento Arduino

Para fazer o gerenciamento e controle do sistema é utilizado uma plataforma de desenvolvimento Arduino, Fig. 3.13, composta por um microcontrolador ATmega 2560. Essa plataforma é muito versátil, pois disponibiliza 54 pinos de entradas e saídas digitais, onde 14 delas podem ser utilizadas como saídas PWM, 4 UART's (portas de comunicação serial), 16 entradas analógicas, comunicação USB que serve tanto para alimentação da placa quanto comunicação com o computador.

Através de suas entradas e saídas, é possível receber sinais de sensores assim como fazer acionamentos de LED's, motores, relés e outros. Essa placa permite a conexão de placas

com funções específicas, como os *Shields*, que podem ser de comunicação com internet, GSM, radio frequência, cartão SD e outros.

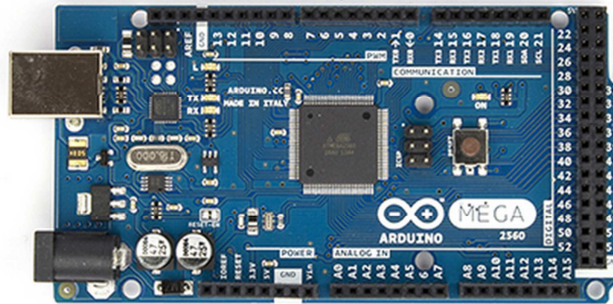


Figura 3.13 – Arduino ATmega2560

Fonte: Arduino.

Em suas portas analógicas o Arduino pode fazer leituras com resolução de 10 *bits*, que corresponde a 2^{10} ou 1024 divisões. A tensão de trabalho varia de 0 V a 5 V em tensão contínua, obtendo uma resolução mínima de 5 V/1024 igual a 0,00488 V/bits.

Para a montagem da microrrede, após a conexão de todos os dispositivos, a tensão de alimentação do Arduino ficou em 4,88 V, sendo necessário ajustar o valor da resolução mínima que ficou em 0,00476 V/bits.

3.2.1.2 Sensor de corrente ACS712

Para fazer a leitura das correntes elétricas do sistema, foram utilizados transdutores de corrente modelo Allegro ACS712. Esse componente é um circuito integrado (CI), que sua principal característica é a sensibilidade em relação aos campos magnéticos. Esse componente possui internamente um sensor de Efeito Hall, muito utilizado para medição de corrente, tanto alternada quanto contínua.

Esses sensores são fabricados para várias faixas de corrente. Os modelos escolhidos são o ACS712-30A, de ± 30 A destinados ao controle das correntes contínuas e o ACS712-5B de ± 5 A para as correntes alternadas.

Conforme a documentação do fabricante do sensor ACS712-30, para cada 1 A de corrente elétrica que percorre o sensor, é gerado uma diferença de potencial V_{cc} de 66 mV. Já o ACS712-5 gera uma V_{cc} de 185 mV. Para cada faixa de corrente elétrica suportada pelo sensor, existe um valor de sensibilidade específico. A Figura 3.14 mostra um dos sensores que é utilizado no sistema.

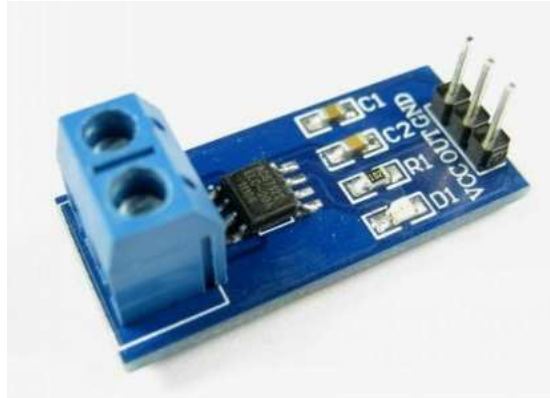


Figura 3.14 - Placa do sensor de corrente.
Fonte: EMBEDDED LAB.

Esse sensor possui uma resposta de saída de $5 \mu\text{s}$ com resistência interna de $1,2 \text{ m}\Omega$ para uma alimentação de 5 V , possuindo um erro total de $1,5 \%$ a uma temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. A Figura 3.15 mostra a faixa de trabalho do sensor ACS712-30.

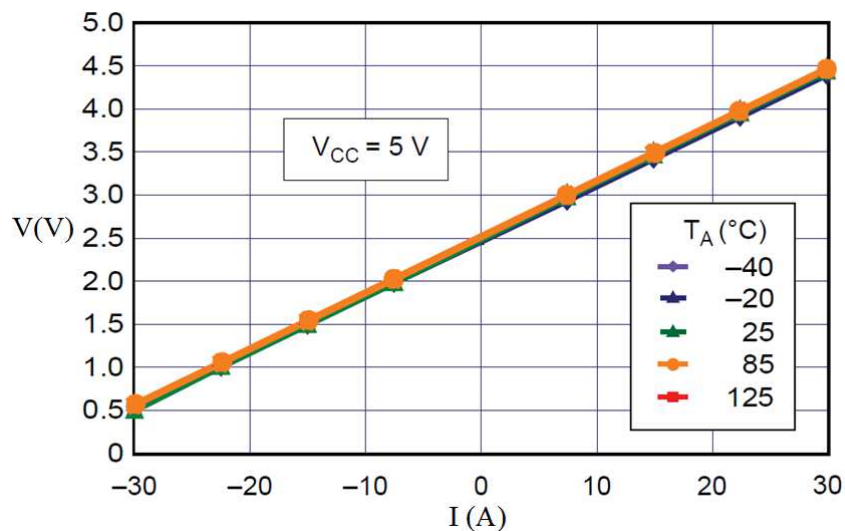


Figura 3.15- Representação da faixa de trabalho do sensor ACS712-30.
Fonte: ALLEGRO.

Como característica de funcionamento, esse sensor fornece em sua saída uma tensão de $V_{cc}/2$ quando não há corrente passando por ele. A alimentação dos sensores é fornecida pela plataforma Arduino estando em $4,88 \text{ V}$, logo não havendo corrente elétrica, os sensores fornecem em suas saídas $2,44 \text{ V}$. Essa informação é importante para a elaboração do algoritmo que faz a manipulação dos dados lidos pelo Arduino.

Para os sensores utilizados foram verificados seus fundos de escala tanto para 0 V quanto para a tensão de referência do Arduino, $4,88 \text{ V}$, de forma a encontrar a sensibilidade

de cada sensor. Foram calibrados com o auxílio de um multímetro digital modelo ET-2076A da marca Minipa. Esse equipamento possui uma exatidão de $\pm 0,5\%$ para a faixa de tensão contínua utilizada e de $\pm 1\%$ para tensão alternada.

3.2.1.3 Sensor de Tensão

O Arduino pode fazer leituras de tensão em suas entradas analógicas de até 5 V em tensão contínua. Entretanto a rede elétrica fornece tensão alternada em torno de 220 V, não podendo o Arduino fazer esse tipo de leitura, necessitando para isso fazer um condicionamento desse sinal.

Para esse condicionamento de sinal, foi produzido um sensor proporcional que converte a tensão alternada de 220 V para uma tensão de 5 V contínua. A Figura 3.16 mostra o sensor que foi produzido juntamente com o circuito elétrico.

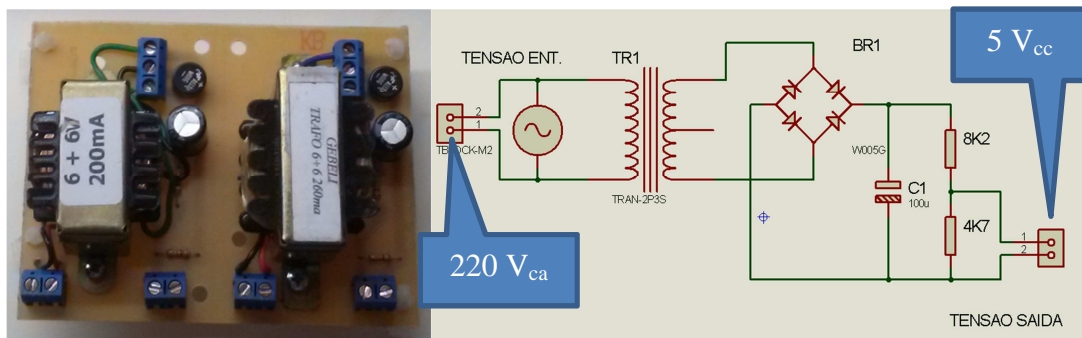


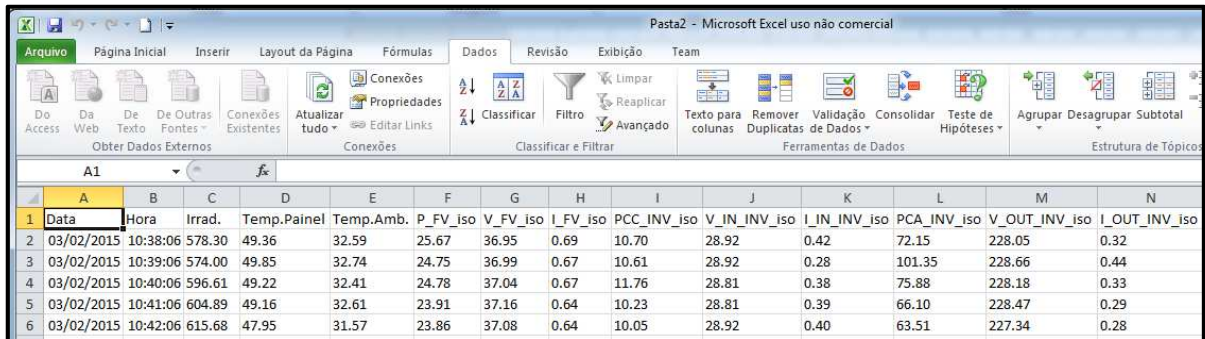
Figura 3.16 – Sensor de tensão montado e circuito elétrico.

Neste circuito a tensão de entrada de 220 V é rebaixada pelo transformador para 6 V. Na configuração montada com a ponte de diodos BR1, a tensão é retificada para tensão contínua pulsante. O capacitor C1 serve para filtrar a forma de onda, transformando-a contínua mais estável. Os dois resistores servem para dividir a tensão e obter 5 V.

3.2.1.4 Shield SD

Fazendo parte do sistema de aquisição de dados o *Shield SD* é o responsável por fazer a interface entre a plataforma Arduino e o banco de dados. O método de armazenamento dos dados se dá através de um arquivo *.CSV que o Arduino gera com as informações coletadas de minuto a minuto das variáveis geradas pelo sistema.

Esse arquivo pode ser visualizado no Microsoft Excel para posterior manipulação dos dados, como pode verificado na Fig. 3.17.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Data	Hora	Irrad.	Temp.Painel	Temp.Amb.	P_FV_iso	V_FV_iso	I_FV_iso	PCC_INV_iso	V_IN_INV_iso	I_IN_INV_iso	PCA_INV_iso	V_OUT_INV_iso	I_OUT_INV_iso
2	03/02/2015	10:38:06	578.30	49.36	32.59	25.67	36.95	0.69	10.70	28.92	0.42	72.15	228.05	0.32
3	03/02/2015	10:39:06	574.00	49.85	32.74	24.75	36.99	0.67	10.61	28.92	0.28	101.35	228.66	0.44
4	03/02/2015	10:40:06	596.61	49.22	32.41	24.78	37.04	0.67	11.76	28.81	0.38	75.88	228.18	0.33
5	03/02/2015	10:41:06	604.89	49.16	32.61	23.91	37.16	0.64	10.23	28.81	0.39	66.10	228.47	0.29
6	03/02/2015	10:42:06	615.68	47.95	31.57	23.86	37.08	0.64	10.05	28.92	0.40	63.51	227.34	0.28

Figura 3.17 - Amostra dos dados visualizados no Microsoft Excel.

O arquivo gerado fica armazenado em um cartão de memória do tipo micro – SD, que fica conectado ao *Shield SD*, como mostra a Fig. 3.18. Com o cartão de memória instalado, o sistema tem capacidade de armazenar até 2 Gb de informação, que resulta em aproximadamente 18 anos de dados. Os dados são gravados linha a linha sempre com a data e hora local para que o processo de análise seja de fácil manuseio.

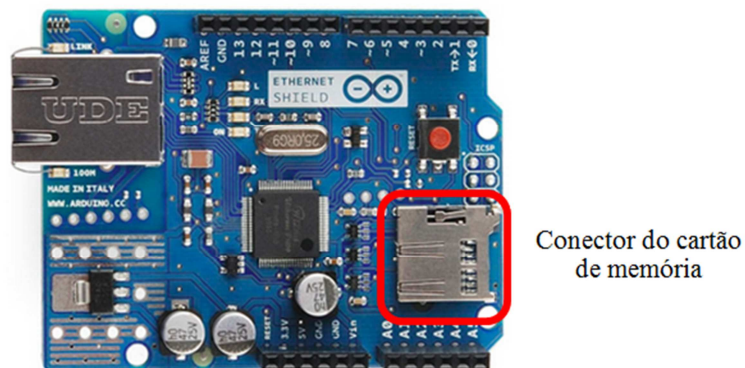


Figura 3.18 - *Shield SD* utilizado no sistema.
Fonte: Arduino.

3.2.1.5 Display de Cristal Líquido

Para que dados possam ser visualizados em tempo real no quadro de comando, foi instalado um display de LCD. Esse display mostra as informações do sistema separadas por

módulos. Foram implementadas 10 telas que podem ser visualizadas separadamente através do apertado de um botão que fica junto ao display.

A cada apertado do botão a tela muda e mostra as informações específicas do sistema. Essas informações são atualizadas a cada 350 ms, para que se possa perceber como está o comportamento da microrrede. A Figura 3.19 mostra o display LCD que faz a interface entre o operador e o equipamento.

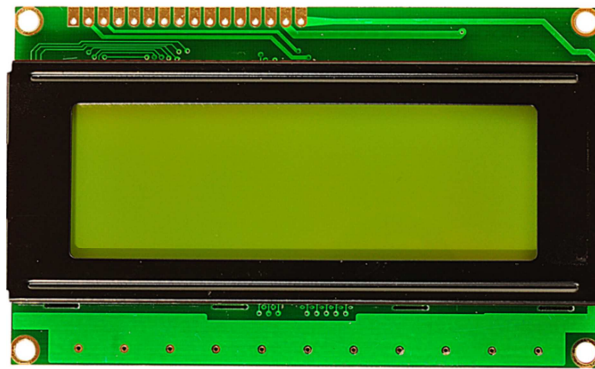


Figura 3.19 – Display LCD utilizado.

3.2.1.6 Chaveamento da carga

Para que o sistema supervisor funcione adequadamente, foi instalado um rele com dois conjuntos de contato que tem por função trocar a carga de uma rede para a outra. A lógica de comutação do rele é feita através de software em função dos parâmetros de entrada dos sensores de monitoramento. A carga pode ser alimentada pela rede isolada ou pela rede da concessionária. O supervisor definirá, conforme diretrizes que foram programadas.

3.2.1.7 Ventilação

Em função do grande número de entradas e saídas utilizadas pelo Arduino, o componente teve aumento de temperatura de trabalho, somado a alimentação do *Shield SD*. Para amenizar esse efeito, foi instalado um cooler para gerar uma ventilação forçada nos componentes, a fim de trabalharem com temperaturas mais baixas.

3.2.1.8 Relógio de tempo real RTC

Para que o sistema de aquisição de dados possa armazenar os dados de forma cronológica, foi instalado um relógio de tempo real RTC (*Real Time Clock*). Esse relógio é um CI modelo DS1307 de baixa potência que fornece a data em dia, mês e ano e o tempo em segundo, minuto e hora, além do dia da semana.

Esse componente é montado junto a uma placa e a uma bateria de 3 V, que fornece energia para o componente mesmo não estando conectado a nenhum sistema, tendo um consumo inferior a 500 nA, com uma autonomia de mais de 10 anos, segundo o fabricante.

A Figura 3.20 mostra o modelo de relógio que é utilizado neste trabalho. Para garantir a precisão, o circuito é composto por um cristal oscilador de 32,768 kHz. Dependendo da qualidade do cristal, pode ocorrer atrasos ou avanço no tempo, assim sendo, esse cristal deve possuir uma capacitância interna da ordem de 12,5 pF.

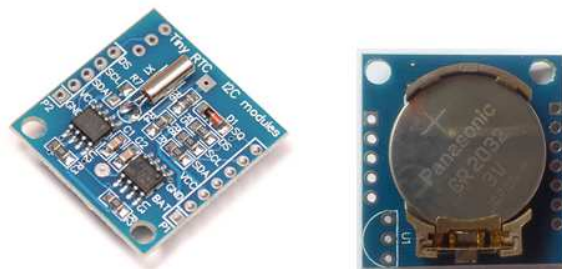


Figura 3.20 – RTC modelo DS1307.

3.2.1.9 Fonte de alimentação

Para suprir a energia do quadro, foi construída uma fonte de alimentação, Fig. 3.21, composta por uma saída simétrica de ± 12 V, uma saída simétrica de ± 5 V e uma saída fixa de 24 V. A proposta desse tipo de fonte é poder fornecer recurso para outros tipos de componentes além dos já utilizados.

A saída de 24 V é destinada a alimentação do relé de comutação da rede, enquanto que a saída de 5 V alimenta o display LCD e ao Arduino.

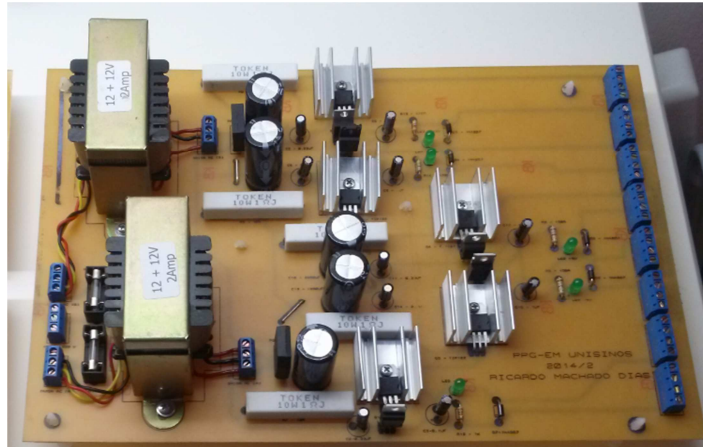


Figura 3.21 – Fonte de alimentação do sistema de monitoramento e controle da microrrede.

Como o *Shield SD* é conectado ao Arduino, a energia necessária para suprir a demanda do componente deve passar pelo Arduino, gerando uma queda de tensão quando alimentado pelo *USB*. Assim é necessária uma alimentação externa, essa oriunda da fonte de alimentação de 12 V, que foi rebaixada para alimentar o Arduino com 7,5 V.

3.2.1.10 Monitoramento da Irradiância

O monitoramento da irradiância é feito através de um módulo fotovoltaico de silício monocristalino de 5 W, Fig. 3.22, que foi calibrado com o auxílio da estação meteorológica do Laboratório de Energias Renováveis da Unisinos, que oferece a opção de alguns sensores, como radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar, precipitação, direção e velocidade dos ventos.



Figura 3.22 - Módulo utilizado para medir a irradiância.

Dentre os sensores, a estação meteorológica da UNISINOS utiliza para medir a radiação solar um fotodiodo, Fig. 3.23, que possui uma resposta espectral de 400 a 1100 nm, semelhante a de uma célula fotovoltaica. Foi instalado um resistor *shunt* entre os terminais positivo e negativo do módulo, que gera uma queda de tensão proporcional a corrente que o percorre. O valor da queda de tensão foi verificado através de um sistema de aquisição da Agilent, configurado para fazer leituras de tensão a cada meio segundo.



Figura 3.23 - Sensor fotodiodo da estação meteorológica UNISINOS.

Esse valor de tensão é convertido em irradiância para posteriormente ser comparado com os valores obtidos na estação meteorológica. De posse desses valores foi traçada uma curva e encontrada a equação característica, que relaciona a irradiância com a tensão do shunt. Foi encontrada a incerteza combinada w_{cel} da medida que ficou em $\pm 5\%$ no fundo de escala.

3.2.1.11 Monitoramento das temperaturas ambiente e de célula

Para o monitoramento das temperaturas ambiente e de uma célula de um módulo são utilizados sensores de temperatura modelo LM35 conforme mostrado na Fig. 3.24. Esses sensores são circuitos integrados com saídas de tensão linear proporcional a temperatura em graus Celsius. Esse dispositivo possui uma incerteza garantida de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sua faixa de trabalho fica entre $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, operando com uma tensão de alimentação de 4 até 30 V, e com uma tensão proporcional de saída de $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$.

3.3.1 Algoritmo na Plataforma Arduino.

No algoritmo implementado na plataforma Arduino existem funções para o tratamento dos dados de tensão, corrente, temperatura e irradiância. Os valores de tensão e corrente elétricas são processados de modo a obter as potências de entrada e de saída dos componentes que fazem parte da microrrede.

Através desses valores, pode-se obter a energia consumida pela carga. Essas informações podem ser visualizadas em um display LCD instalado na porta do quadro elétrico. Os fluxogramas de cada função podem ser visualizados no apêndice A, enquanto que o algoritmo completo pode ser visualizado no apêndice B.

O algoritmo foi estruturado de forma modular, subdividido em várias funções nas quais cada uma delas deve executar uma determinada ação. Dentro do algoritmo existe uma função principal em que estão todas as outras funções com uma determinada ordem de processamento. Essa ordem está de acordo com o sentido da conversão da energia solar em energia elétrica, pois algumas funções necessitam de um parâmetro que foi processado em outra função antecedente.

A ordem das funções pode ser verificada na Fig. 3.26. O tempo gasto pelo microcontrolador para executar a função principal é de aproximadamente 350 ms, portanto a cada 350 ms é feita uma varredura em todo o sistema de aquisição de dados. Um ponto importante a se considerar dentro dessa varredura é a verificação da tensão da rede da concessionária.

```

////////////////////////////////////
void loop()
{
    unsigned long inicio = millis();
    tensao_painelFV1_0 ();
    tensao_bateria_1 ();
    tensao_painelFV2_2 ();
    irradiancia_3 ();
    tensao_conces_4 ();
    tensao_critica_5 ();
    tensao_backup_7 ();
    i_bat_6 ();
    if (V_conces <= 100.0)
    {
        digitalWrite (pino_rele,LOW); // REDE ISOLADA
        V_crit = V_OUT_INV_iso;
    }
    Temp_painel_8 ();
    Temp_ambiente_9 ();
    I_OUT_INV_iso_10();
    I_FV_con_11();
    I_con_12();
    I_conces_13();
    I_crit_14();
    I_FV_iso_15 ();
    calcula_dados ();
}

```

```

protocolo_serial();
telas ();
currentMillis = millis();
if(currentMillis - previousMillis >= interval)
{
    digitalWrite (13,HIGH);
    escreve_myFile();
    digitalWrite (13,LOW);
    previousMillis = currentMillis;
}
val = digitalRead (29);
if (val == LOW)
{
    digitalWrite (13,HIGH);
    tela=tela+1;
    digitalWrite (13,LOW);
}
if ( carga>=85.00 && V_conces >=100.00 && selo == LOW)
{
    digitalWrite (pino_rele,LOW); // REDE ISOLADA
    V_crit = V_OUT_INV_iso;
    selo = HIGH;
}
if (carga<85.00 && V_conces >=100.00)
{
    digitalWrite (pino_rele, HIGH); // CONCESSIONARIA
    V_crit = V_conces;
}
if (carga>=98.00 && V_conces >=100.00)
{
    selo = LOW;
}
if (V_conces <= 100.0)
{
    digitalWrite (pino_rele,LOW); // REDE ISOLADA
    V_crit = V_OUT_INV_iso;
}
wdt_reset();
}

```

Figura 3.26 - Trecho do algoritmo da rotina principal.

Como a principal função da microrrede é fazer o gerenciamento de energia para uma carga, onde a mesma sempre deve estar energizada, o algoritmo deve ser capaz de monitorar as redes isolada/conectada e fazer a mudança de rede caso seja necessário. Uma importante função a ser analisada é a de verificação da tensão da concessionária, pois se a carga estiver sendo alimentada pela concessionária, e por algum motivo a rede for desligada, o sistema deve identificar essa falta de energia e automaticamente fazer a mudança de rede sem haver prejuízos para a carga, pois a mesma pode ser de um determinado processo considerado crítico.

Sendo assim existem dois momentos dentro da função principal onde é feito a verificação da tensão da concessionária, uma delas é no meio da rotina principal e uma no final da rotina. Como a varredura é feita em 350 ms, então a cada 175 ms é feita a verificação de tensão, ficando abaixo dos 200 ms do inversor *Sunny Boy 1200*, garantindo uma rápida mudança de rede sem prejuízo a carga.

3.3.1.1 Apresentação das telas

A sequência de informações das telas está diretamente relacionada com o sentido da conversão da energia solar em elétrica. Um botão ao ser pressionado, muda as informações do display. Exemplificando, uma tela mostra as informações de data e hora, seguida das informações de temperaturas de uma célula de um dos módulos, temperatura ambiente e irradiância, Fig. 3.27. A Figura 3.28 apresenta o esquema de ligação do LCD.



Figura 3.27 - Visualização de uma das telas apresentada no sistema.

Todas essas informações são atualizadas a cada 350 ms. Cada informação visualizada através do display tem uma função específica dentro do algoritmo, facilitando a manutenção do código caso seja necessário. Cada função faz o tratamento de uma grandeza física de modo a convertê-la em outra grandeza que se deseja analisar.

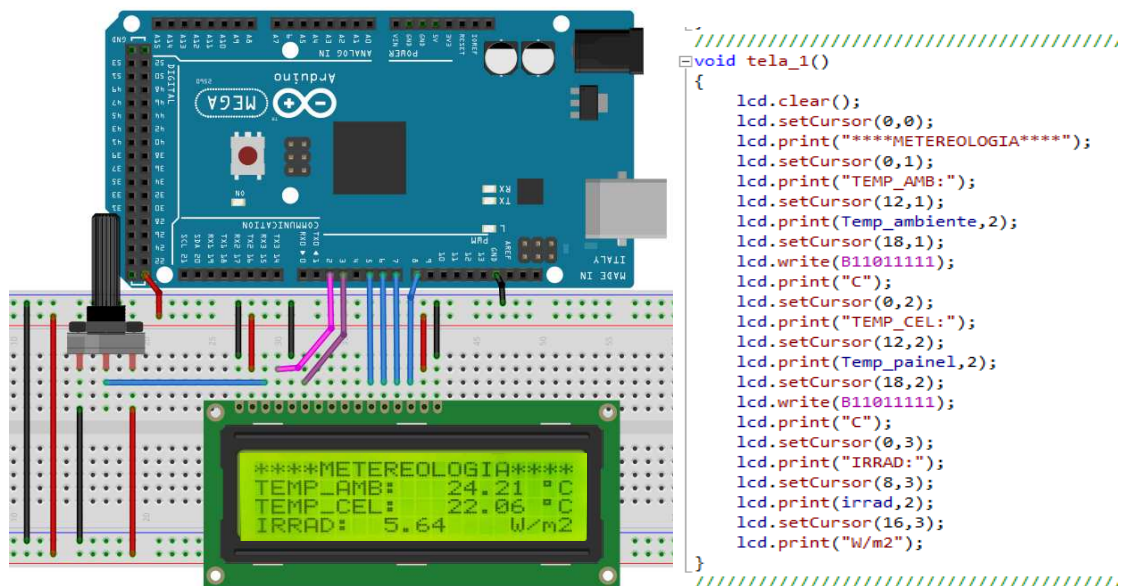


Figura 3.28 - Esquema de ligação do display LCD e uma das funções que apresentam as variáveis no display.

3.3.1.2 Determinação das Temperaturas Ambiente e de Célula

As funções que determinam as temperaturas ambiente e de célula, são feitas 1000 aquisições através do conversor A/D (análogo/digital) do microcontrolador de um nível de tensão gerada pelo sensor LM35. Essa conversão gera um valor inteiro entre 0 a 1023, correspondente a resolução do conversor, que nesse caso é de 10 bits. Após, esse valor inteiro é convertido em um valor de tensão através do algoritmo. Com esse valor de tensão é feita uma relação com a sensibilidade do sensor, que nesse caso é de $10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, podendo assim determinar as temperaturas ambiente e de célula. Todos os passos dessa função são executados em aproximadamente 40 ms.

A Figura 3.29 mostra as ligações dos sensores e o fluxograma básico da lógica empregada. O sensor de temperatura de célula está ligado ao pino analógico 8 da plataforma Arduino, enquanto que o sensor de temperatura ambiente está ligado ao pino 9.

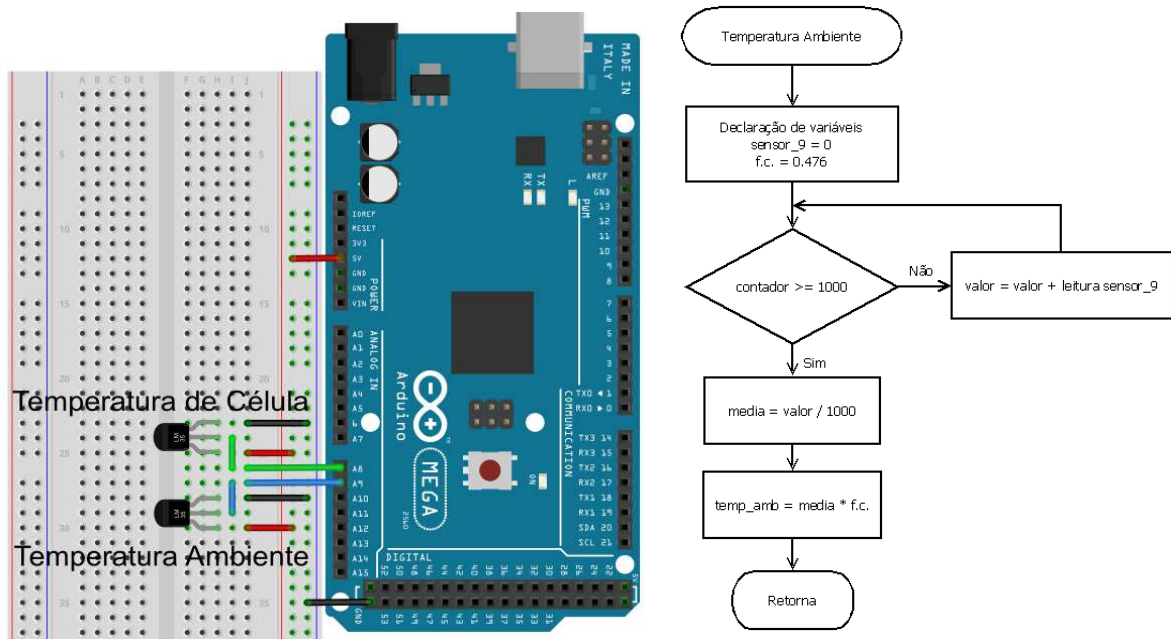


Figura 3.29 - Esquema de ligações dos sensores LM35 e fluxograma básico para determinar valores de temperaturas de célula e ambiente.

3.3.1.3 Determinação das Tensões Elétricas Contínuas

Para a determinação das tensões dos painéis FV foi feito a verificação dos níveis de tensão que cada painel poderia chegar. A tensão de circuito aberto dos módulos monocristalinos é de 21,7 V, enquanto que a dos multicristalinos é de 22,1 V, respectivamente na condição padrão de teste. Os módulos multicristalinos foram associados em série, de modo que a tensão de circuito aberto do painel ficou da ordem de 160 V, enquanto que o painel de

módulos monocristalinos chegou a tensão de circuito aberto de 40 V. Já a tensão nominal do banco de estocagem de energia é de 24 V, mas com carga máxima a tensão de circuito aberto chegou a 28,8 V.

Como as entradas analógicas da plataforma Arduino suportam tensões de até 5 V, foram construídos divisores de tensão para condicionarem esses sinais. Cada divisor de tensão foi desenvolvido especificamente para esse tipo de aplicação. A Figura 3.30 mostra as relações dos divisores de tensões com suas tensões de referências.

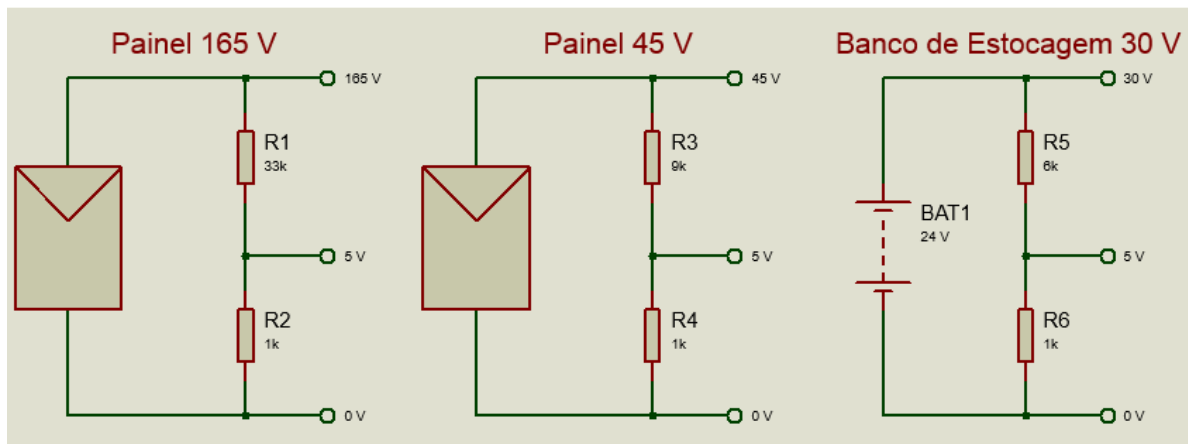


Figura 3.30 - Relações das tensões dos divisores de tensão.

As entradas analógicas 1, 2 e 3 da plataforma Arduino ficaram destinadas aos divisores de tensão. Por se tratar de tensão contínua, cada função do algoritmo relacionado com os divisores de tensão faz a média de 25 leituras. A média de cada leitura é relacionada com o seu devido divisor de tensão. A Figura 3.31 mostra o trecho implementado no Arduino, onde se pode verificar o processo das 25 leituras com a relação aos resistores utilizados em cada divisor de tensão.

```

//////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
void tensao_bateria_1 () //até 30V
{
    int sensor_1 = 0;
    for (int i=0; i<25; i++)
    {
        sensor_1 = sensor_1 + analogRead(A1);
    }
    sensor_1 = sensor_1 / 25;
    V_bat = (sensor_1 * voltsporUnidade)/(0.989/5.96);
}
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////

```

Figura 3.31 - Trecho do algoritmo que faz a leitura de tensão do banco de estocagem.

No algoritmo, sensor_1 refere-se ao nome dado à variável que armazena a leitura da entrada analógica A1. Após a soma das 25 leituras é feita a média entre elas. Como o conversor A/D faz a relação entre um valor de tensão lido e retorna um valor inteiro entre 0 e 1023, é feita a transformação desse inteiro em um valor de tensão novamente, através da variável “voltsporUnidade”. O valor dessa variável é determinado em função da resolução do conversor A/D da plataforma Arduino, que nesse caso é de $10 \text{ bits} = 2^{10} = 1024$.

Com todo o sistema ligado a tensão de trabalho do dispositivo ficou em 4,88 V e dividindo pela resolução do conversor chega-se ao menor valor de leitura do conversor que ficou em 4,76 mV. A relação (0,989/5,96) é referente aos valores reais dos resistores utilizados no divisor de tensão. Assim a função tensão_bateria_1 retorna o valor de tensão do banco de estocagem através da variável V_bat.

3.3.1.4 Determinação das Correntes Elétricas Contínuas

Os valores das correntes elétricas geradas pelos painéis FV em relação a corrente do banco de estocagem são determinadas de formas diferentes. Enquanto que os painéis produzem corrente elétrica contínua, o sentido de fluxo dessas correntes é um só. Elas saem do painel e vão em direção aos inversores c.c./c.a. e ou em direção ao controlador de carga, no caso do sistema isolado. No caso do banco de estocagem existe um fluxo de corrente diferente, que pode estar entrando ou saindo do banco, isso dependendo da demanda de energia no momento.

Para as correntes geradas pelos painéis FV foram utilizados os sensores de corrente modelo ACS712-30, Fig. 3.16. Como já foi mencionado anteriormente, com esses sensores podem ser verificadas correntes elétricas tanto em regime c.c. ou c.a., pois, como pode ser verificado na Fig. 3.16, o range de atuação do sensor vai de 0 V a 5 V, fornecendo uma tensão $V = V_{cc}/2$ quando não há corrente passando por ele. Isso significa que quando não há corrente elétrica, a entrada analógica do Arduino mostra um valor inteiro de 512, porque $1024/2$ é igual a 512.

Por se tratar de correntes contínuas e os fluxos de correntes dos painéis serem sempre os mesmos, saindo dos painéis, serão gerados somente valores positivos de corrente, logo, quando houver corrente circulando pelo sistema, os valores na entrada analógica serão sempre maiores que 512. Por esse motivo, dentro das funções que medem as correntes elétricas dos painéis FV, após serem feitas 25 medidas e feita a média, é realizado o processo de subtração

de 512 desse valor, obtendo apenas valores positivos. Esse valor é convertido em tensão através da variável “voltsporUnidade” e aplicada a sensibilidade do sensor, que nesse caso é de 66 mV/A. Assim a função retorna o valor da corrente contínua que está percorrendo o sensor. A Figura 3.32 mostra o trecho do algoritmo que traz a função explicada.

```

////////////////////////////////////
void I_FV_iso_15 ()
{
    int sensor_15 = 0;
    for (int i=0; i<25; i++)
    {
        sensor_15 = sensor_15 + analogRead(A15);
    }
    sensor_15 = sensor_15 / 25;
    I_FV_iso = (((sensor_15-509)*voltsporUnidade)/0.066);
    if (I_FV_iso<=0){I_FV_iso = 0;}
}
////////////////////////////////////

```

Figura 3.32 - Trecho do algoritmo que executa a função de leitura da corrente contínua do painel FV.

Já o processo para determinar os fluxos de correntes do banco de estocagem de energia é feito através do balanço das correntes e da eficiência do inversor e do controlador de carga, como pode ser verificado na Fig. 3.33.

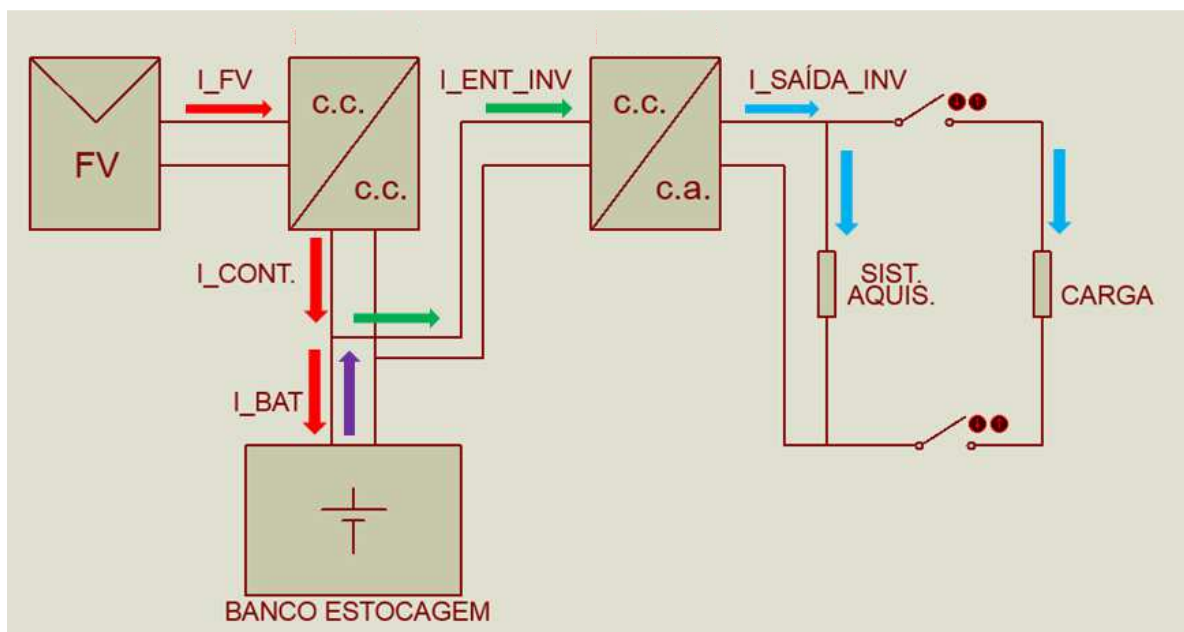


Figura 3.33 - Balanço das correntes elétricas do sistema isolado.

Para essa análise, alguns fatores devem ser considerados, como a alimentação do sistema de aquisição de dados que está ligado a essa parte da microrrede, proporcionando a segurança de que sempre haverá energia para o sistema mesma quando não estiver disponível a rede da concessionária. Isso proporciona um fluxo ininterrupto de energia passando pelo inversor c.c./c.a..

Quando a carga está sendo alimentada pelo sistema isolado algumas situações podem ocorrer, sendo elas:

a) **Período noturno:**

Não existirá a corrente gerada pelo painel FV, portanto não haverá corrente na saída do controlador de carga. A corrente de entrada do inversor será exclusivamente do banco de estocagem, Eq. 3.1, onde I_{ENT_INV} é a corrente de entrada do inversor e I_{BAT} é a corrente da bateria.

$$I_{ENT_INV} = I_{BAT} \quad (3.1)$$

b) **Período diurno:**

Para o período diurno há duas situações. A primeira é quando a produção de corrente elétrica do painel FV é inferior ao consumo da carga mais sistema de aquisição. Nessa situação, o que é gerado pelo painel FV vai para a carga mais sistema de aquisição e o restante é suprido pelo banco de estocagem. Para essa situação a Eq. 3.2 representa o comportamento do fluxo de corrente elétrica, onde I_{CONT} representa a corrente elétrica que sai do controlador de carga.

$$I_{ENT_INV} = I_{CONT} + I_{BAT} \quad (3.2)$$

A segunda situação é quando a produção do painel é superior a demanda da carga mais sistema de aquisição. Além de suprir a necessidade da carga mais sistema de aquisição, o excedente é injetado no banco de baterias, Eq. 3.3.

$$I_{ENT_INV} = I_{CONT}. \quad (3.3)$$

Para a determinação dos fluxos de correntes, são considerados todos os equipamentos do sistema isolado, onde a Eq. 3.4 e a Eq. 3.5 satisfaz as situações apresentadas, onde V_{FV} representa da tensão do painel FV, enquanto que I_{FV} é a corrente contínua gerada pelo painel FV.

$$I_{CONT} = \left(\frac{V_{FV} I_{FV}}{0,88 V_{BAT}} \right) \quad (3.4)$$

$$I_{BAT} = \left(\frac{V_{SAÍDAINV} I_{SAÍDAINV}}{0,88 V_{BAT}} \right) - I_{CONT} \quad (3.5)$$

3.3.1.5 Determinação das Tensões Elétricas Alternadas

A determinação dos valores de tensão dos inversores e da rede da concessionária segue o mesmo princípio, condicionar o sinal a ser lido através de um hardware, para posterior manipulação. Como já foi mencionado, a plataforma Arduino suporta apenas 5 V_{cc} em c.c. em suas entradas analógicas, mas como as tensões a serem verificadas estão na ordem dos 220 V em corrente alternada, foi feito condicionamento desses valores de tensão de forma a possibilitar a leitura através do conversor A/D do Arduino. Esse condicionamento é feito através do sensor de tensão, Fig. 3.16, que transforma a tensão alternada em tensão contínua.

Para a verificação das tensões, são executadas 1000 leituras do conversor A/D, após é feito a média dessas 1000 leituras e transformadas em um valor de tensão novamente. Para a transformação em um valor de tensão, são utilizadas constantes para cada uma das tensões. Isso se deve ao fato de que mesmo sendo tensões alternadas, elas são geradas de modos diferentes, onde os inversores geram as senóides através do PWM, enquanto que a concessionária é uma senóide pura. As constantes foram determinadas através do método de comparação, onde foi utilizado um multímetro, marca Minipa modelo ET-2076A para fazer as leituras e estipular o valor das constantes. A Figura 3.34 apresenta o trecho do algoritmo demonstrando a função que determina a tensão sobre a carga.

```

////////////////////////////////////
void tensao_critica_5 ()
{
    double sensor_5 = 0;
    for (int i=0; i<1000; i++)
    {
        sensor_5 = sensor_5 + analogRead(A5);
    }
    sensor_5 = sensor_5 /1000;
    V_crit = sensor_5 * 0.253;
}
////////////////////////////////////

```

Figura 3.34 - Trecho do algoritmo com a função de leitura de tensão da carga.

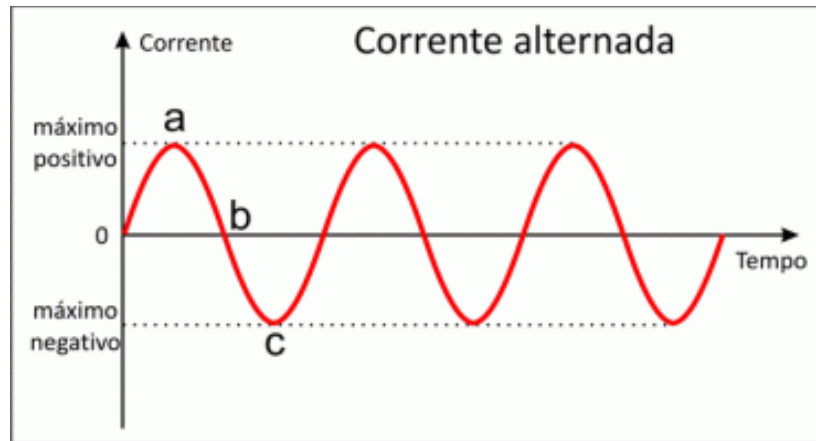


Figura 3.36 - Forma de onda da corrente alternada.

A estratégia utilizada é conhecida como RMS (*Root Mean Square*), ou valor eficaz. Para a verificação do valor de corrente, o conversor A/D faz a soma de 400 leituras que são elevadas ao quadrado. Após é feita a raiz quadrática da média dessas 400 leituras, para então ser convertida em um valor de tensão. Com esse valor de tensão é determinada a corrente elétrica através da sensibilidade do sensor. A Figura 3.37 mostra o trecho do algoritmo que apresenta a função da corrente elétrica alternada consumida pela carga.

```

////////////////////////////////////
void I_crit_14()
{
    float sensorValue_aux = 0;
    float sensorValue = 0;
    for(int i=400; i>0; i--)
    {
        sensorValue_aux = (analogRead(A14)-512.8);
        sensorValue += pow(sensorValue_aux,2);
    }
    sensorValue = sqrt(sensorValue/400) * voltsporUnidade;
    I_crit = sensorValue/0.13083811464421684808836934956298;
}
////////////////////////////////////

```

Figura 3.37 - Função que determina o valor de corrente elétrica alternada na carga.

A utilização de 400 amostras se deve ao fato de que a execução dessa função é executada em aproximadamente 16 ms, que é o valor próximo de um ciclo da senoide apresentada. Essa função possibilita que todas as leituras feitas possuam valores positivos, deixando assim os valores de corrente elétrica sempre positiva.

Mas para determinar os sentidos das correntes elétricas no sistema conectado à rede é utilizada uma equação que contemple todas elas, pois a corrente elétrica da concessionária pode ter fluxo em dois sentidos, isso dependendo de como está sendo alimentada a carga e

como está a produção de energia elétrica do inversor *Sunny Boy* 1200. A Eq. 3.6 determina o sentido dos fluxos da corrente elétrica no sistema conectado, onde os mesmos podem ser verificados na Fig. 3.38, onde I_{CARGA} representa a corrente elétrica alternada consumida pela carga, $I_{CONCESSIONÁRIA}$ é a corrente elétrica que pode ter dois sentidos de fluxo, além da $I_{SAÍDA_INV}$ que é a corrente elétrica na saída do inversor.

$$I_{CARGA} = I_{CONCESSIONÁRIA} + I_{SAÍDA_INV} \quad (3.6)$$

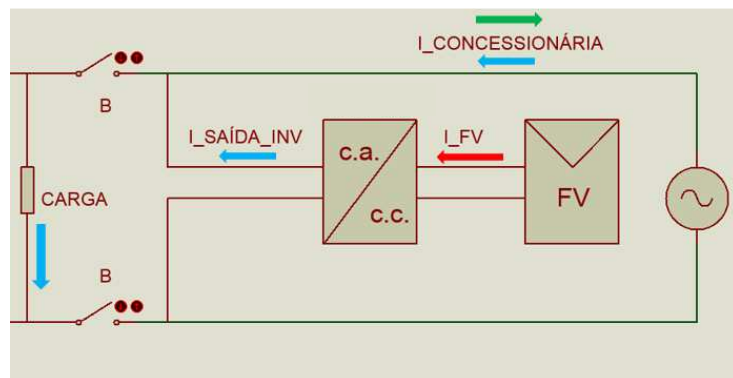


Figura 3.38 - Fluxos de correntes elétrica no SFCR.

3.3.1.7 Determinação do Valor de Irradiância

Para a determinação do valor de irradiância, a função executa na entrada analógica 3 da plataforma Arduino 1000 leituras no conversor A/D. Posteriormente é feita a média desses valores e transformado em um valor de tensão. Através da Eq. 3.7 é feita a relação do valor de tensão com a irradiância. Essa equação foi gerada através do processo de calibração do módulo FV utilizado, sendo considerado o fundo de escala da estação meteorológica, que varia de 0 a 1800 W/m², com uma faixa de atuação do resistor *shunt* de 0 a 200 mV, onde G_M é a irradiância medida e U_{shunt} é a tensão gerada pelo resistor *shunt*.

$$G_M = \frac{U_{shunt} - 2,563 \times 10^{-4}}{1,617 \times 10^{-4}} \quad (3.7)$$

A Figura 3.39 mostra o trecho do algoritmo em que é demonstrado como é feito o tratamento da função.

```
////////////////////////////////////  
void irradiancia_3 ()  
{  
    float sensor_3 = 0;  
    for (int i=0; i<1000; i++)  
    {  
        sensor_3 = sensor_3 + analogRead(A3);  
    }  
    sensor_3 = (sensor_3 /1000);  
    irrad =((sensor_3*voltsporUnidade)-0.000256332684886)/0.000161668095135;|  
    if (irrad<=0){irrad = 0;}  
}
```

Figura 3.39 - Função que faz o tratamento do valor da irradiância.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos neste estudo, em consonância à metodologia já explicitada. Os dados coletados pelo sistema de aquisição, responsável pelo gerenciamento da microrrede, foram exportados e tabulados no software Microsoft Excel. Foram obtidos os dados nos meses de abril e maio de 2015, coletados de forma amostral, com 1.440 leituras por dia, lidas na escala temporal do minuto.

Os dados coletados permitiram traçar dois perfis característicos da geração de energia pela microrrede com relação às condições climáticas: uma condição em dia de céu claro e uma condição intermitente, observada quando há presença de nuvens. A análise será dividida em duas partes, uma relacionada a parte conectada à rede elétrica e a outra relacionada a parte do sistema isolado.

4.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

4.1.1 Dia de céu claro

A Figura 4.1 mostra a irradiância solar para um dia de céu claro. Com esse perfil de irradiância foi analisado o comportamento da microrrede. Dentro desse perfil foram consideradas as curvas de potências na entrada e na saída do inversor *Sunny Boy 1200*, P_{cc} e P_{ca} , respectivamente. Através desses dados foi estimada a produção de energia elétrica injetada na rede da concessionária.

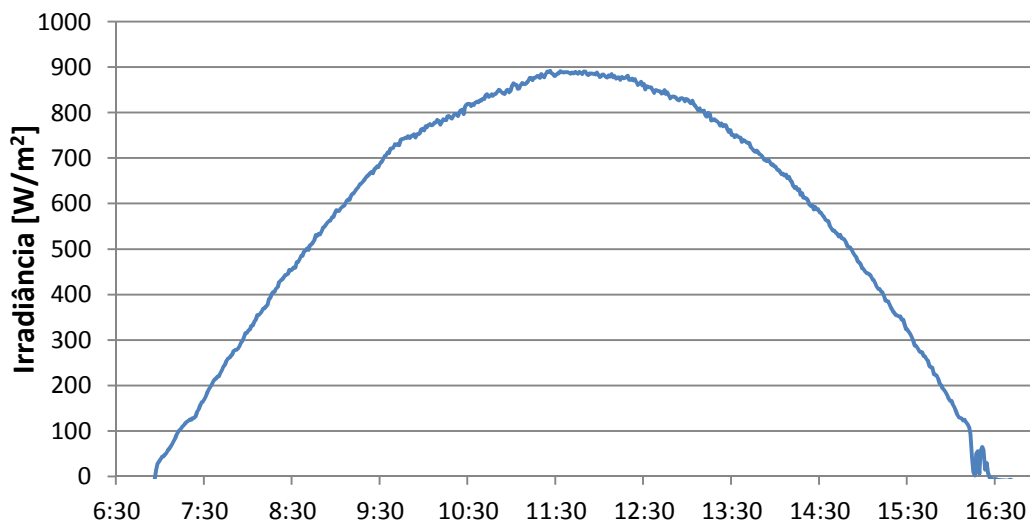


Figura 4.1 - Representação da irradiância de um dia de céu claro.

4.1.2 Perfis de potências no SFCR

Já a Fig. 4.2 apresenta o comportamento dos perfis de potência na entrada e saída do inversor conectado à rede, mostrando claramente que as potências respondem diretamente a irradiância. Para esse dia específico, 05/05/2015, o sistema conectado à rede elétrica injetou 5,8 kWh de energia na rede da concessionária. A eficiência global, η_s , obtida foi de 9 %, enquanto que o inversor apresentou uma eficiência média, η_{inv} , de 84 %.

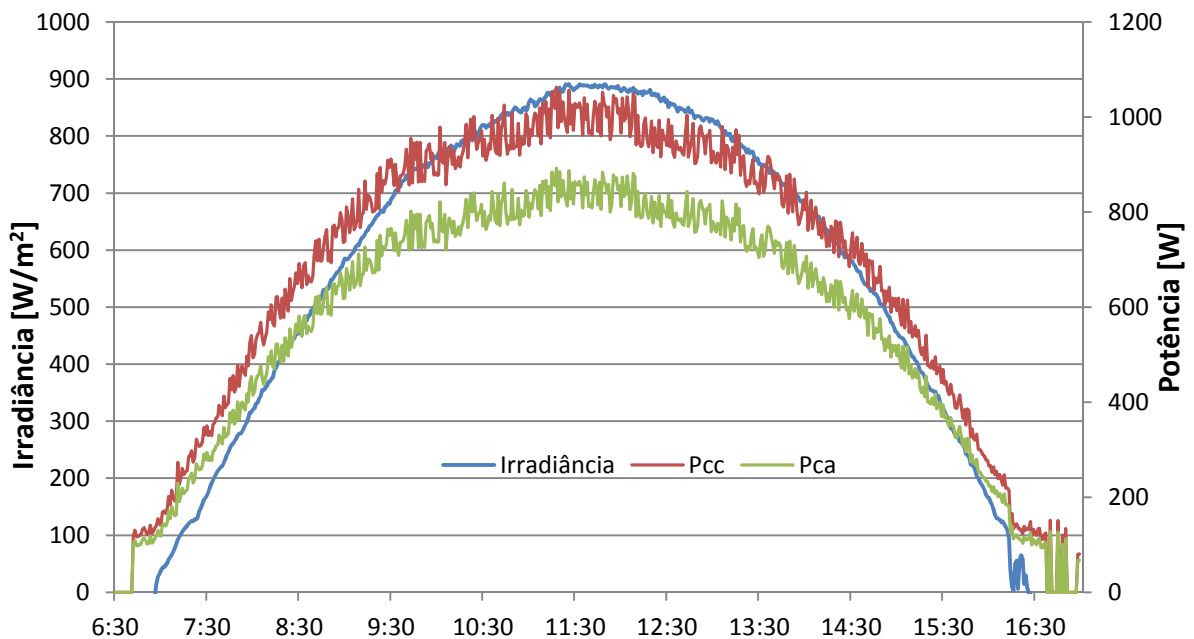


Figura 4.2 - Perfis de potências de entrada e saída do inversor *Sunny Boy 1200*.

4.1.3 Fluxo de corrente no SFCR

A Figura 4.3 apresenta o comportamento das correntes elétricas geradas pelo SFCR quando não está suprindo a demanda da carga, estando apenas injetando corrente elétrica na rede da concessionária. Nota-se que a partir do momento em que começa a produção de energia elétrica, a carga, que passou a noite sendo alimentada exclusivamente pela concessionária começa a ser alimentada também pelo sistema FV, ocorrendo uma queda do valor de corrente. Os valores negativos da corrente da concessionária, significa que o fluxo de corrente está indo em direção à concessionária, injetando corrente elétrica na rede. O processo de injeção de corrente elétrica na rede da concessionária durou aproximadamente 9 horas para o dia em questão.

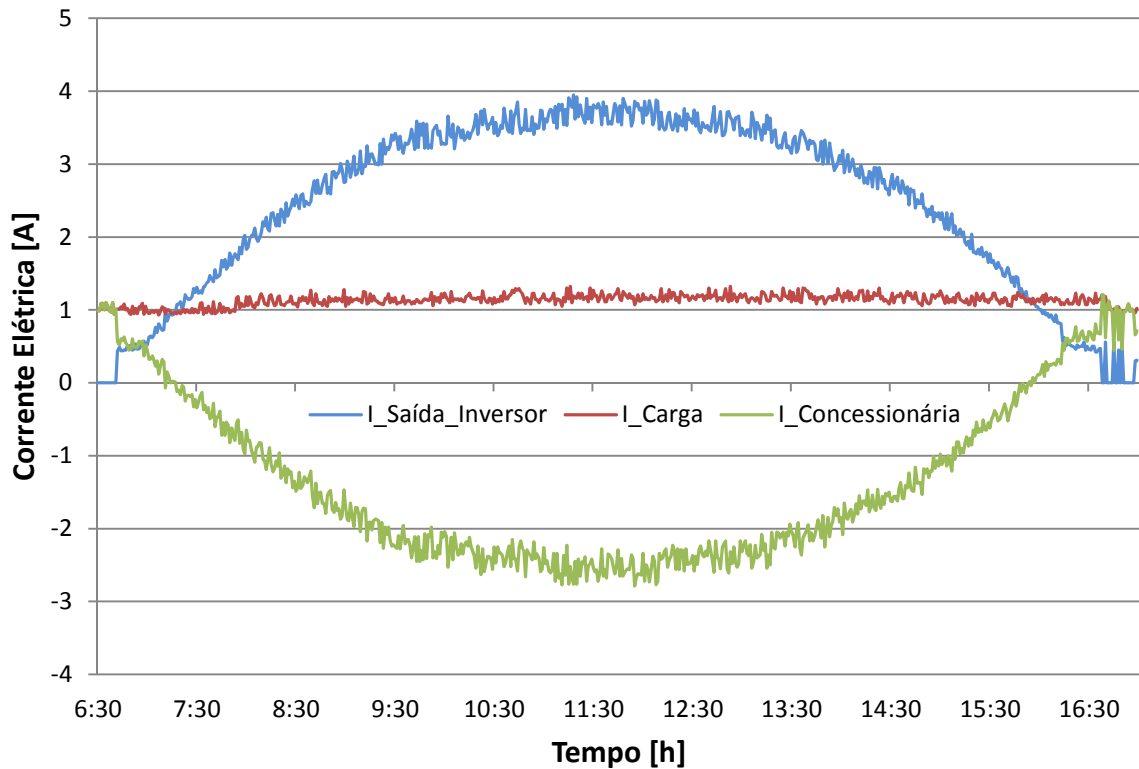


Figura 4.3 – Verificação dos sentidos das correntes elétricas da carga, saída do inversor e da rede da concessionária.

4.1.4 Variação da tensão do painel com a temperatura

A variação da tensão do painel com a temperatura se torna evidente na Fig. 4.4. De acordo com os dados coletados, observa-se que com o aumento da temperatura do módulo (célula), o valor da tensão do painel FV se reduz. Esse fenômeno se deve às perdas térmicas em cada célula do módulo FV. Neste caso específico, considera-se apenas a temperatura da parte posterior de um dos módulos que compõem o painel FV.

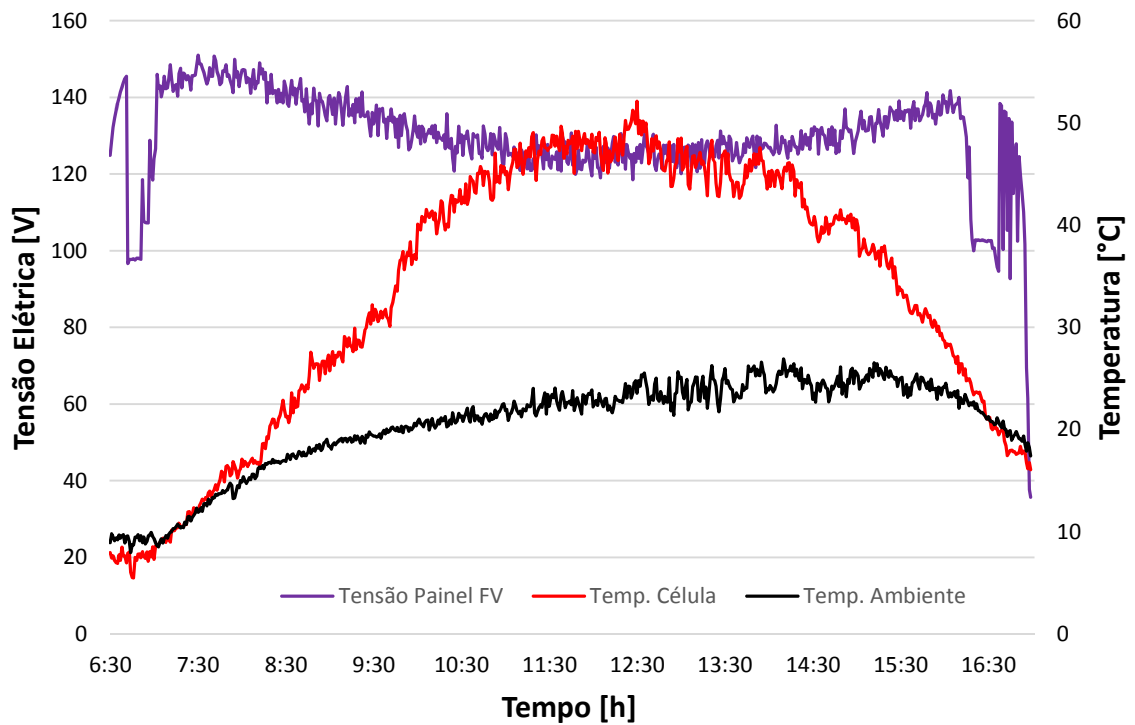


Figura 4.4 - Comportamento da tensão do painel FV com relação ao aumento da temperatura do módulo.

4.1.5 Dia de céu parcialmente encoberto

Assim como para o dia de céu claro, foram analisadas as curvas de potência na entrada e na saída do inversor *Sunny Boy* 1200 para o dia de céu parcialmente encoberto. A Figura 4.5 representa o comportamento da irradiância para esse dia.

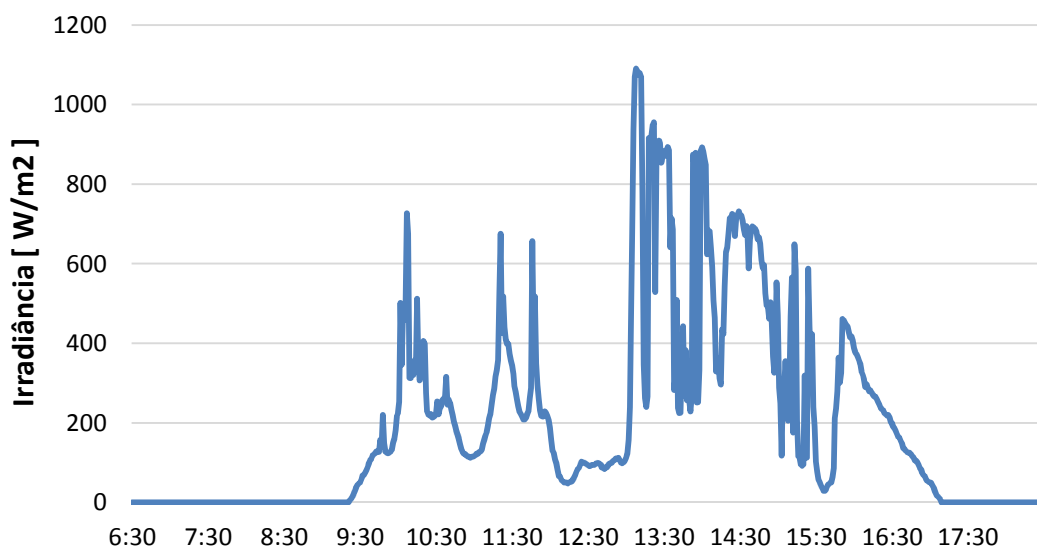


Figura 4.5 – Representação da irradiância de um dia de céu encoberto.

4.1.6 Perfis de potência para o dia encoberto

Percebe-se também a contribuição da radiação difusa que ocasionou picos de irradiância, chegando à 1176 W/m^2 , superior ao percebido no dia com céu claro. Para esse dia em específico, 15/05/2015, o sistema conectado à rede elétrica injetou 3 kWh de energia na rede da concessionária. A Figura 4.6 mostra o comportamento dessas curvas de potências.

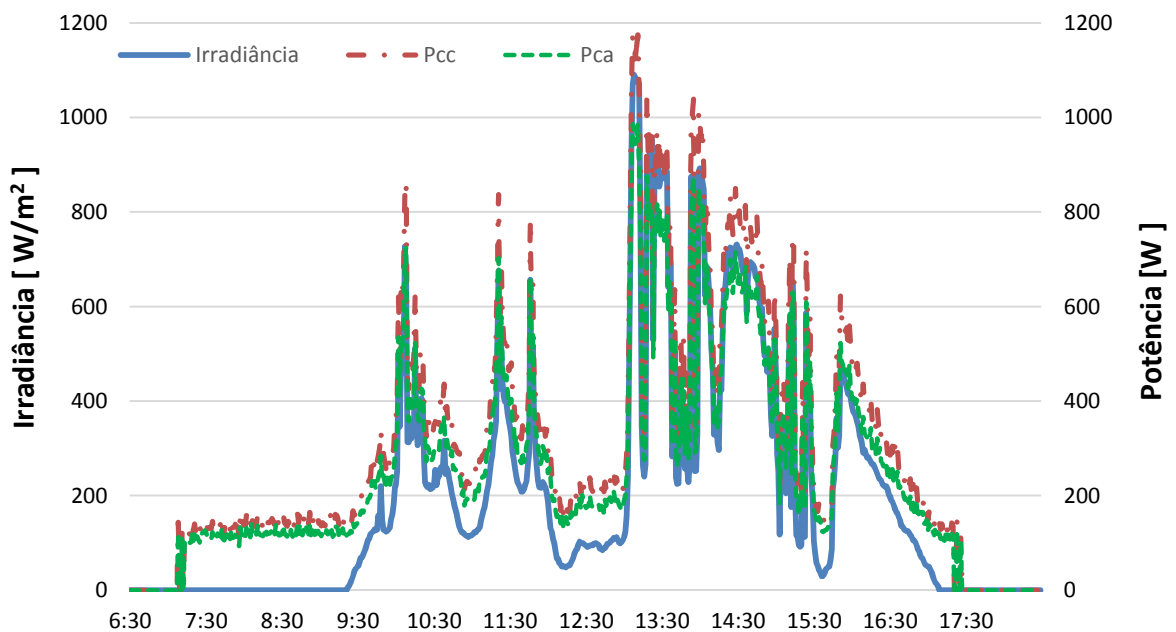


Figura 4.6 - Perfis de potências de entrada e saída do inversor *Sunny Boy 1200*.

4.1.7 Fluxo de corrente no SFCR

Assim como para o dia de céu claro, foi analisado o comportamento dos fluxos de corrente do SFCR para o dia de céu encoberto. Como nesse dia houve grande variação de irradiância, os fluxos de correntes seguiram o mesmo perfil, como pode ser verificado na Fig. 4.7. Como a carga está sendo alimentada praticamente em quase todo o período do dia, o que é produzido pelo painel FV é injetado na rede da concessionária. No início e no término do

dia verifica-se os momentos em que a rede da concessionária está alimentando a carga.

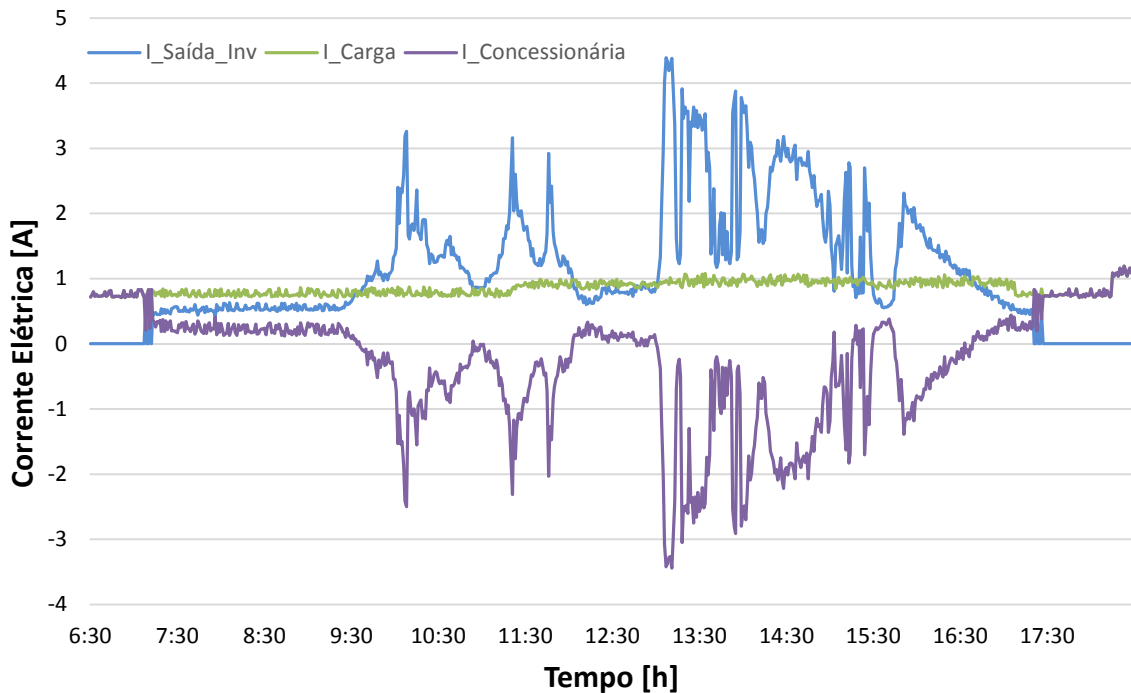


Figura 4.7 - Verificação dos sentidos das correntes elétricas da carga, saída do inversor e rede da concessionária.

4.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO

Os perfis de irradiância para os dias de céu claro e para o de céu encoberto, são os mesmos para o SFI. Dentro da função de monitorar as redes da concessionária e da isolada através do sistema de aquisição, o supervisor implementado na plataforma Arduino tem por função a mudança de rede de acordo com os níveis de tensão da carga e da rede da concessionária.

Caso ocorra a falta de energia elétrica na concessionária, o sistema supervisor muda automaticamente de rede. Para verificar essa mudança, foi feito um teste simulado no qual foi retirada a energia da entrada do quadro de comando onde está conectada à rede da concessionária. A Figura 4.8 mostra os momentos em que houve o desligamento da rede da concessionária e posterior religamento, através da verificação dos perfis de potência na entrada e na saída do inversor.

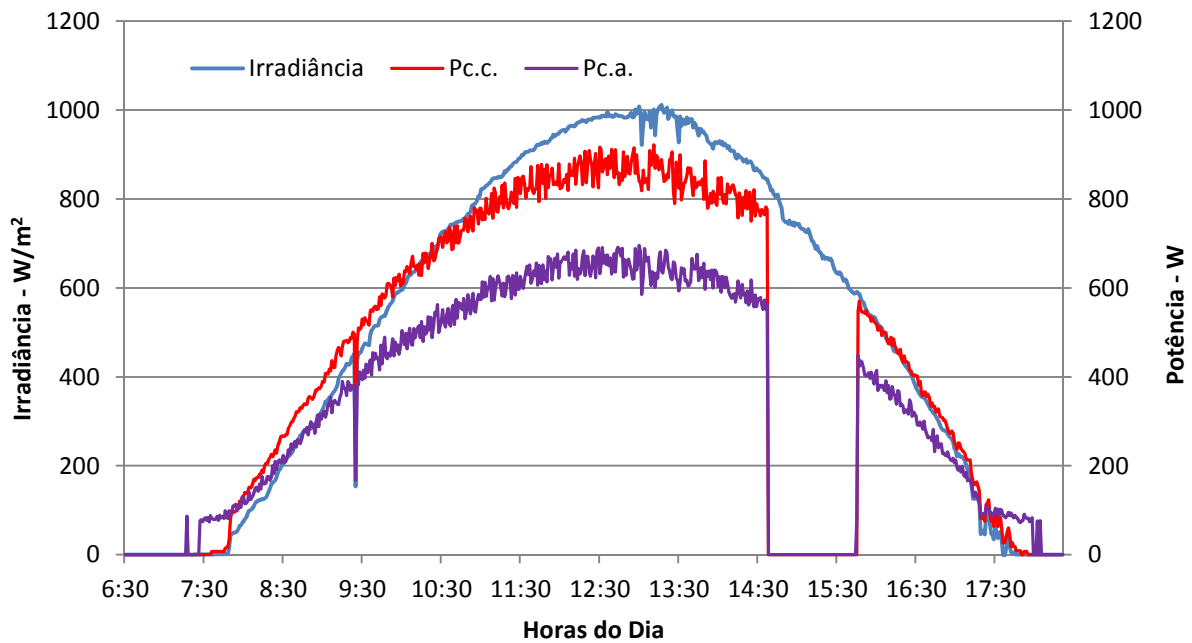


Figura 4.8 - Momento do desligamento e religamento da rede da concessionária.

4.2.1 Perfis de Potências no SFI

Além do supervisor fazer a mudança de rede para a isolada, caso ocorra falta de energia na concessionária, outra função implementada no algoritmo é de mudar de rede (concessionária para isolada) caso o banco de estocagem de energia esteja completo. Estando o banco de estocagem de energia carregado, correspondente a 98 % de carga, e havendo energia elétrica na rede da concessionária, o sistema supervisor mudará de rede, passando da rede da concessionária para a rede isolada. Essa situação permanecerá até que o banco de estocagem atinja uma profundidade de descarga de 50 %, correspondente a 23 V de nível de tensão do banco de estocagem.

A Figura 4.9 apresenta os comportamentos das potências da carga, da concessionária, da saída do inversor da rede isolada P_{ca} e o nível de tensão do banco de estocagem. O comportamento da potência da carga mostra que a mesma está sempre alimentada, sendo que até aproximadamente as 07h45 min, a carga está sendo alimentada pela rede da concessionária, enquanto que o sistema isolado, representado pela potência P_{ca} está suprindo a demanda do sistema de aquisição de dados.

Com o início do amanhecer, 06h45 min, começa o processo de carga do banco de estocagem de energia, que passou toda a noite suprindo a demanda do sistema de aquisição de dados. Após às 07h45 min, momento no qual o banco de estocagem chega aos 98 % de carga, o sistema supervisor muda de rede, passando novamente para a rede isolada. Como é de se

esperar, a potência P_{ca} da saída do inversor da rede isolada aumenta, suprindo a demanda da carga e do sistema de aquisição. Considerando consumo aproximado da carga de 5,76 kWh por dia, sendo que desse valor, 2,16 kWh é fornecido pelo SFI, e o restante pela concessionária.

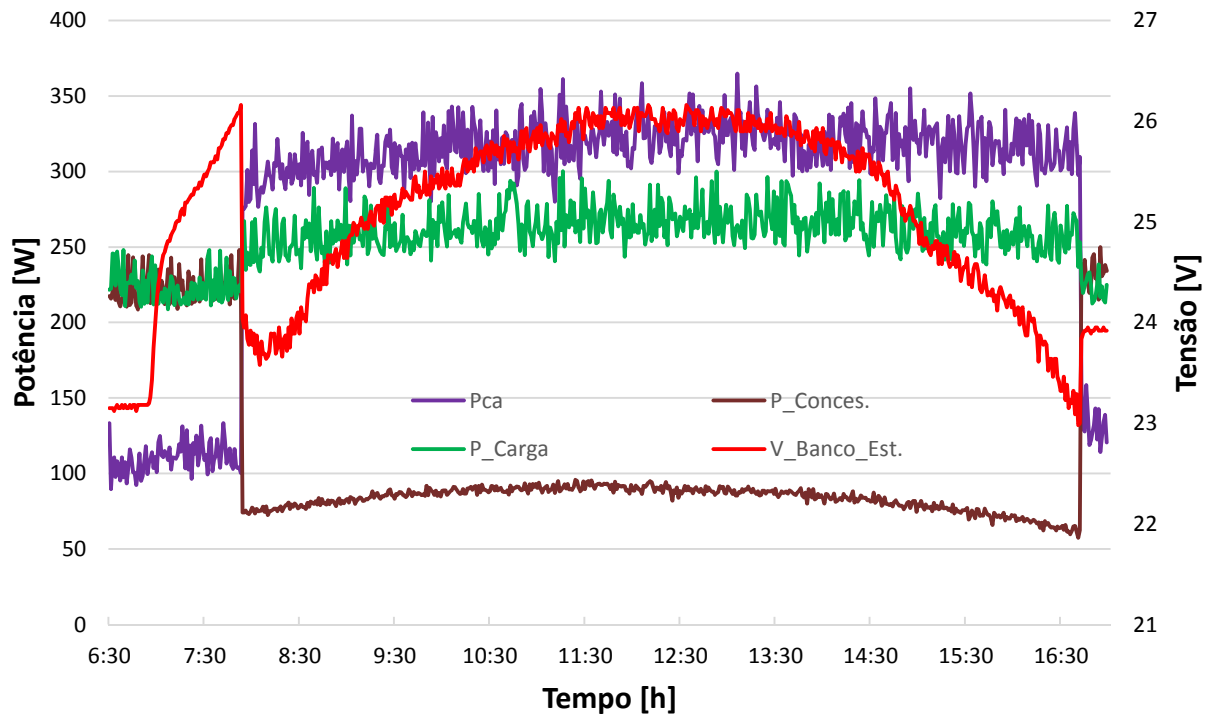


Figura 4.9 - Comportamento das potências e da tensão do banco de estocagem.

4.2.2 Fluxo de corrente no SFI

Outra forma de analisar o suprimento de energia para a carga é através dos fluxos de correntes elétricas. A Figura 4.10 apresenta o comportamento das correntes elétricas do sistema isolado durante o momento da troca de rede. Esses fluxos de corrente elétrica estão de acordo com as Eq. 3.2 a 3.5. A Figura evidencia os momentos em que a fluxo de corrente está saindo do banco de estocagem e o momento em que está entrando no banco, momento em que as baterias estão sendo carregadas.

Durante o período da noite, a corrente elétrica está saindo do banco de estocagem, portanto o valor de corrente elétrica na entrada do inversor do sistema isolado é a mesma que está saindo do banco de estocagem. A partir do momento em que começa o amanhecer, e começa o processo de geração de energia elétrica pelo painel FV, surge a corrente que sai do controlador de carga e ao mesmo tempo começa a fluir em direção ao inversor. Com o aumento da corrente que sai do controlador, a corrente que estava saindo do banco de estocagem

diminui na mesma proporção. A representação de valores negativos para a corrente do banco de estocagem significa que a corrente elétrica que sai do controlador está suprindo a necessidade da carga e ao mesmo tempo está carregando o banco de estocagem de energia.

Com o banco de estocagem carregado a 98 % de sua carga total, é feita a mudança da rede pelo sistema supervisor e a carga fica alimentada pela rede isolada, enquanto que o sistema conectado à rede fica injetando energia na rede da concessionária. Estando a carga alimentada pelo sistema isolado, e a geração de energia elétrica for maior que as demandas da carga e do sistema de aquisição de dados, o banco de estocagem de energia também será carregado. Esse processo se dá até ao meio dia aproximadamente, onde então começa a diminuir a produção de energia elétrica e a corrente do banco de estocagem começa a fluir em direção a carga novamente.

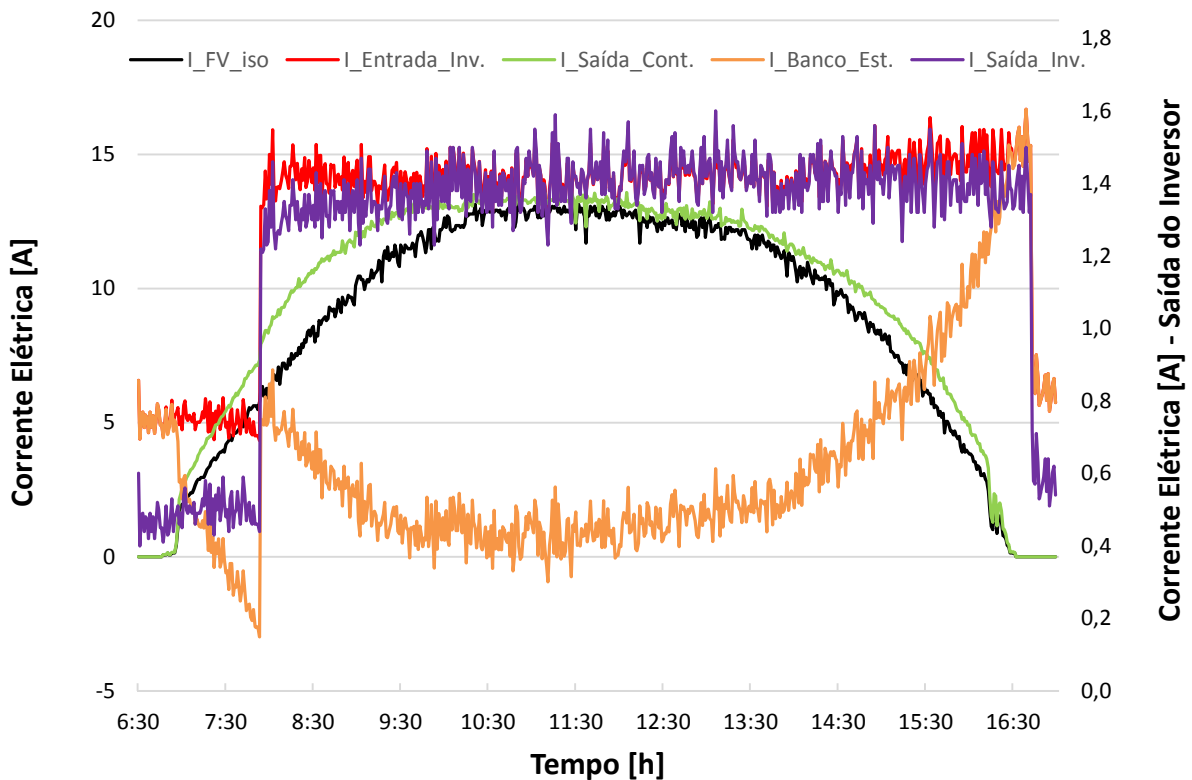


Figura 4.10 - Fluxos de correntes elétricas do SFI.

4.3 ANÁLISE DAS INCERTEZAS

Como a função do trabalho é executar medidas de tensão, corrente, temperatura e irradiância, devem ser verificadas as incertezas envolvidas no processo. O principal equipamento envolvido no processo de aquisição de dados é a plataforma Arduino, que como já foi citado possui uma resolução de leitura em suas entradas analógicas de 10 bits. Isso significa que para uma tensão de entrada das portas de 0 V a 5 V, essa tensão é dividida em 1024 partes, correspondente aos 10 bits.

Segundo o manual do microcontrolador, a exatidão de medida fica nos dois bits menos significativos (± 2 LSB - *Least Significant Bit*). Assim, a incerteza de medida nas entradas analógicas é de $\pm 0,3\%$. Como todas as medidas passam pelas entradas analógicas, logo cada uma delas terá pelo menos $\pm 0,3\%$ de incerteza. Considerando o fundo escala de 5 V, obtém-se ± 15 mV de incerteza.

4.3.1 Propagação de erros

Para cada variável V associada a uma leitura m feita pelo sistema de aquisição, possui um intervalo de incerteza w , dado por $V = m \pm w$. Segundo Vuolo (1999), quando as medidas estão associadas ao fundo de escala do equipamento, esse será o desvio máximo de qualquer leitura. Quando uma variável é composta pela relação de outras variáveis é chamada de incerteza combinada w_r , que são representadas de acordo com suas relações, como mostra o conjunto de Eq. 3.8 (a, b, c).

$$(A \pm a) \pm (B \pm b) \rightarrow w_r = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (3.8a)$$

$$(A \pm a)(B \pm b) \rightarrow w_r = AB \sqrt{\left(\frac{a}{A}\right)^2 + \left(\frac{b}{B}\right)^2} \quad (3.8b)$$

$$(B \pm b)/(A \pm a) \rightarrow w_r = \frac{B}{A} \sqrt{\left(\frac{a}{A}\right)^2 + \left(\frac{b}{B}\right)^2} \quad (3.8c)$$

Considerando a função $V = f(x_1 \dots x_n)$, Kline e McClintock *apud* (Dias, 2006) a Eq. 3.9 determina a incerteza combinada.

$$w_r = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial V}{\partial x_n} w_n\right)^2} \quad (3.9)$$

4.3.1.1 Incertezas nas correntes contínuas e alternadas.

Para a verificação das correntes contínuas e alternadas, foram utilizados os sensores ACS712-30A e ACS-7125B, respectivamente, que possuem incerteza de medida de $\pm 1,5 \%$. Considerando as incertezas combinadas dos sensores e do Arduino, utilizando a Eq. 3.8a chega-se à incerteza combinada w_i de $\pm 1,5 \%$, correspondendo a um valor $8,00 \pm 0,12$ A para c.c. e $5,00 \pm 0,08$ A para c.a., extraídas da Eq. 3.10.

$$w_i = \sqrt{w_{ARDUINO}^2 + w_{ACS}^2} \quad (3.10)$$

4.3.1.2 Incertezas nas tensões contínuas e alternadas.

A verificação das tensões em contínuas e alternadas se dá de forma diferente. Para as tensões em c.c. é feito apenas um divisor de tensão para rebaixar a tensão, enquanto que na alternada é feito a transformação de alternada em contínua e depois é utilizado um divisor de tensão. A verificação dos níveis de tensão se deu através de comparação com o multímetro Minipa que possui uma exatidão de $\pm 0,5 \%$ para tensões contínuas e $\pm 1,0 \%$ para tensões alternadas. Logo as incertezas combinadas para tensão em c.c. é de $w_v \pm 0,5 \%$. Considerando a tensão medida do arranjo fotovoltaico igual a 160 V, e aplicando tal incerteza, chega-se ao valor de $\pm 0,8$ V. Da mesma forma para tensão c.a., a incerteza combinada é $w_v \pm 1 \%$. Aplicando esta incerteza na tensão eficaz da rede, 220 V, chega-se ao valor de $\pm 2,2$ V, determinadas através das Eq. 3.11 (a e b).

$$w_{vcc} = \sqrt{w_{ARDUINO}^2 + w_{MINIPA}^2} \quad (3.11a)$$

$$w_{vca} = \sqrt{w_{ARDUINO}^2 + w_{MINIPA}^2} \quad (3.11b)$$

4.3.1.3 Incertezas nas potências contínuas e alternadas.

As incertezas nas medidas das potências contínuas e alternadas consideram as incertezas tanto das tensões quanto das correntes. Para as potências em c.c., a incerteza w_{pcc} ficou em 1280 ± 20 W, limite de entrada do inversor, retirada da Eq. 3.12a, enquanto que a potência em alternada possui uma incerteza w_{pca} de 1100 ± 20 W dada pela Eq. 3.12b.

$$w_{pcc} = \sqrt{(V_{c.c.} \cdot w_i)^2 + (I_{c.c.} \cdot w_{vc.c.})^2} \quad (3.12a)$$

$$w_{pca} = \sqrt{(V_{c.a.} \cdot w_i)^2 + (I_{c.a.} \cdot w_{vc.a.})^2} \quad (3.12b)$$

4.3.1.4 Incertezas nas temperaturas

Para a verificação das temperaturas ambiente e de célula, são utilizados sensores de temperatura modelo LM35, cuja faixa de trabalho é de -55°C até 150°C , sendo garantida pelo fabricante uma incerteza de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ a 25°C . Considerando o fundo de escala do sensor com incerteza $w_{LM35} \pm 0,3\%$, a incerteza combinada da temperatura w_{temp} fica $\pm 0,4\%$, calculada pela Eq. 3.13.

$$w_{temp} = \sqrt{w_{ARDUINO}^2 + w_{LM35}^2} \quad (3.13)$$

4.3.1.5 Incerteza na irradiância

Como já foi verificado anteriormente, é utilizado um módulo FV como célula padrão calibrado e que apresenta uma incerteza $w_{CEL} \pm 5,0\%$ de fundo de escala. Logo a incerteza combinada para a irradiância w_{irrad} é $\pm 5,0\%$, e aplicando esta incerteza em 1200 W/m^2 se obtém $\pm 60 \text{ W/m}^2$, calculada pela Eq. 3.14.

$$w_{irrad} = \sqrt{w_{ARDUINO}^2 + w_{CEL}^2} \quad (3.14)$$

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A geração de energia elétrica através de fontes renováveis é um tópico em evidência no cenário mundial em razão da iminência do fim dos combustíveis fósseis e o aumento de demanda por energia elétrica. Corroborando, a geração distribuída alia a geração por fontes consideradas "limpas" à injeção da energia diretamente no ponto de consumo. Isso torna o sistema elétrico mais robusto e, teoricamente, seguro a *blackouts*, além de postergar os grandes investimentos em parques de geração e linhas de transmissão. Por este motivo, o estudo destes sistemas é cada vez mais incentivado, de forma a entender o comportamento dos mesmos.

A microrrede implementada neste trabalho permitiu a compreensão e a análise do funcionamento deste tipo de sistema. Teve como objetivo instalar um sistema de monitoramento e controle que fosse capaz de alimentar cargas consideradas críticas. Com os dados coletados pelo sistema de aquisição da microrrede verificou-se que de fato existe grande variação na produção de energia, com pico máximo culminando ao meio-dia solar, perfazendo perfil parabólico desde o amanhecer até o entardecer. Ainda, dias de céu nublados e chuvosos, foram verificados e tornam a curva de geração extremamente variável. Isso indica que, ainda que a amostra de dados coletadas não permita uma análise profunda para um período de tempo contendo todas as estações do ano, pode-se inferir que o resultado provavelmente é coerente com a realidade.

Foi constatado o pleno funcionamento da microrrede FV. Em situação de contingência, a carga crítica não ficou desatendida, comprovando a correta e rápida mudança de rede entre o sistema conectado e a rede isolada. Desta forma, é possível afirmar que a rede isolada preenche aos critérios para atendimento de uma carga considerada crítica. Também foi constatado o perfeito funcionamento da microrrede instalada, tanto do sistema conectado que injeta potência na rede, como do sistema isolado que atende à carga crítica em situação de contingência.

Os fluxos de correntes tanto do sistema conectado à rede quando o sistema isolado se mostrou coerentes com as lógicas do sistema construído nos momentos de carga e descarga do banco de estocagem, assim como a corrente elétrica que é injetada na rede da concessionária.

O sistema de monitoramento e controle de dados mostrou-se satisfatório, com pequenos ajustes a fazer.

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para trabalhos futuros não se descarta o controle da microrrede de forma remota, com acesso aos dados via internet, assim como a modelagem do sistema de estocagem de energia. A utilização de um controlador lógico programável (CLP) com comunicação mais eficiente, através de protocolos específicos, além de uma resolução maior para as medidas das variáveis envolvidas, proporcionará menores incertezas nas medidas.

REFERÊNCIAS

- AISSOU, S. et al. **Modeling and control of hybrid photovoltaic wind power system with battery storage**. France, v.89, Energy Conversion and Management , p. 615-625, 2015.
- ALLEGRO MICROSYSTEMS, LLC. **Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC**. Disponível em:< <http://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/ACS712.aspx>>2013. Acesso: 02 jun. 2014.
- AMÉRICA DO SOL, **Guia para instalação de módulos fotovoltaicos**. Disponível em:< http://www.americadosol.org/energia_fotovoltaica>. Acesso em: 02 set 2014.
- American Society for Testing and Materials ASTM E – 1036, (2002). **Standard Test Methods for Electrical Performance of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells**. USA, Disponível em: <<http://www.astm.org/Standards/E1036.htm> > Acesso em: 12 maio 2014.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 482**, 17 de abril de 2012. Publicada no Diário Oficial da União em 19 de abril de 2012.
- ARAMIZU, Juliana. **Modelagem e Análise de Desempenho de um Sistema Fotovoltaico em Operação Isolada e em Paralelo com uma Rede de Distribuição de Energia Elétrica**. 2010. 112 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2010.
- ARDUINO. Arduino Mega 2560. Disponível em: < <http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMegaA>>. Acesso em: 30 out. 2014.
- ARUL, P. G. et al. **Control strategies for a hybrid renewable energy system**. Malaysia, v.42, Renewable and Sustainable Energy Reviews, p.597-608, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 5410 . **Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. Versão corrigida em 17 mar. 2008. Disponível em: < http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/normas%20e%20relat%F3rios/NRs/nbr_5410.pdf> Acesso em: 18 fev. 2014.
- BASTOS, Renan Fernandes. **Sistema de Gerenciamento para Carga e Descarga de Baterias (Chumbo-Ácido) e para Busca do Ponto de Máxima Potência Gerada em Painéis Fotovoltaicos Empregados em Sistemas de Geração Distribuída**. 2013. 115 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2013.
- BBC. **A História da Eletricidade**. 2012. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=GLZREkocQEE>>. Acesso em: 13 abr. 2013.
- CHAGAS, Marcos Wilson Pereira. **Novas Tecnologias para Avaliação de Baterias**. 2007. 86 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado Profissionalizante em Desenvolvimento de Tecnologia do IEP/LACTEC) . Instituto de Engenharia do Parana (IEP), Curitiba, 2007.

COELHO, Kefas Damazio. **Estudo de uma Fonte Ininterrupta de Corrente Contínua de Baixa Potência Gerenciada por um Microcontrolador.** 2001. 162 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2001.

COPETTI, Jacqueline Biancon.; MACAGNAN, Mario Henrique, **Baterias em Sistemas Solares Fotovoltaicos.** - I Congresso Brasileiro de Energia Solar. (I CBENS), (8 a 11 de 04 de 2007).

DAROS, Higor Bruschi. **Integração de Fontes de Energia Renováveis.** 2013. 56 f. Projeto de Diplomação - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2013.

DE PAULA, Gilberto José. **Medidor de Demanda de Energia Elétrica Residencial com Acesso Remoto.** 2013. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia da Computação) – Curso de Engenharia da Computação (FATECS), Brasília, 2013.

DIAS, João Batista. **Instalação Fotovoltaica Conectada à Rede:** Estudo Experimental para a Otimização do Fator de Dimensionamento. 2006. 175 f. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2006.

EMBEDDED LAB. (2012).Disponível em: <<http://embedded-lab.com/blog/?s=acs712>> Acesso em: 02 set. 2014

EPIA, European Photovoltaic Industry Association. **Global market outlook for photovoltaics 2014-2018.** Belgium: -, 2014.

EPSOLAR, Tracer – 3215RN .Disponível em: <http://www.epsolarpv.com/en/index.php/Product/pro_content/id/158/am_id/136> Acesso em: 21 ago. 2014;

GALDINO, Marco Antônio; PINHO, João. Tavares; **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** CEPTEL – CRESESEB. Rio de Janeiro, 2014.

HIRAKAWA, André Riyuiti. **TUTORIAL DO WTA TRAZ OS PROCESSOS CRÍTICOS EM DISCUSSÃO.** Departamento De Engenharia de Computação e Sistemas Digitais. 2013. Disponível em:< <http://www2.pcs.usp.br/pcsv6/index.php/mais-noticias/318-tutorial-do-wta-traz-os-processos-criticos-em-discussao>> Acesso em: 05 jun. 2014.

IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers. **Standard 1547TM-2003.** USA: junho, 2003.

KYOCERA CORPORATION. 2013. **Manual de Instruções do Módulo KD135SX - UPU.**

LOPEZ, R. A. **Energia Solar para Produção de Eletricidade.** 1º ed. São Paulo: Artiber Editora Ltda. 2012.

LORA, Electo Eduardo Silva; HADDAD, Jamil. **Oportunidades e barreiras da geração distribuída para a distribuição de energia elétrica.** Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

MECATRON. Disponível em: <<http://mecatron.org.br/site/servicos>>. Acesso em 28 set. 2014.

MOCELIN, André Ricardo. ZILLES, Roberto. **Unidade de Capacitação e Difusão de Minirrede Fotovoltaica - Bateria - Diesel - Rede Elétrica**. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES. São Paulo, 18 a 21 set.2012.

NEO SOLAR ENERGIA. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/loja/bateria-estacionaria-freedom-df2500-165ah-150ah.html>> . Acesso em: 27 ago. 2014

NET, O. D. **Oficina da Net**, 2014. Disponível em: <<http://www.oficinadanet.com.br/artigo/ciencia/o-que-sao-os-paineis-solares>>. Acesso em: 26 jul. 2014.

OKADA, N. et al. **Diagnostic method of performance of a PV module with estimated power output in considering four loss factors**. 31 Photovoltaic Specialists Conference, USA, p. 1643-1646, jan. 2005.

OLIVEIRA, S. H. **Geração Distribuída de Eletricidade; Inserção de Edificações Fotovoltaicas Conectadas à Rede no Estado de São Paulo**. Tese de Doutorado, PIPGE - (EP/FEA/IEE/IF) – Universidade de São Paulo (USP), 2002.

PEREIRA, Filipe A. S; OLIVEIRA, Manuel A. S. **Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica**. Portugal: Publindústria, 2011.

PRODIST, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. Elaborado pela ANEEL. Brasília: -, 2014.

RAMPINELLI, Giuliano Arns. KRENZINGER, Arno. BÜHLER, Alexandre José. **Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos Integrados em Edificações: Metodologia para Análise de Desempenho Energético**. 9º Congresso Internacional de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação, Mercofrio 2014.

REIS, L. B. **Geração de Energia Elétrica**. 2º ed., Manole Ed. São Paulo. 2011.

S, B, Vale. et al. **Monitoração e Análise de um Sistema Híbrido Eólico - Diesel para Geração de Eletricidade na Ilha de Marajó - Pará - Brasil**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do (UFPA), Belém, 2000.

SEVERINO, Antônio Joaquim. **Metodologia do trabalho científico**. 23. Ed. São Paulo: Cortez, 2009.

SIEMENS SOLAR GMBH. 1998. **Manual de Instruções do Módulo SP75**

SMA SOLAR TECHNOLOGY AG. 2010. **Manual de Instruções do Equipamento Sunny Boy**.

SMA SOLAR TECHNOLOGY AG. 2012. **Manual de Instruções do Equipamento Sunny Island**.

SPERTINO, Filippo. **Generazione fotovoltaica ed eolica di energia elettrica**. Material de curso. Italia: Politecnico di Torino, 2012.

T&D. *Transmission & Distribution World*. Vol.66, nº9, USA: Penton, Setembro, 2014.

TEIXEIRA, Leandro Lettieri. **Medidor de energia Eletrônico**. 2009. 68 f, Projeto de Diplomação – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2009.

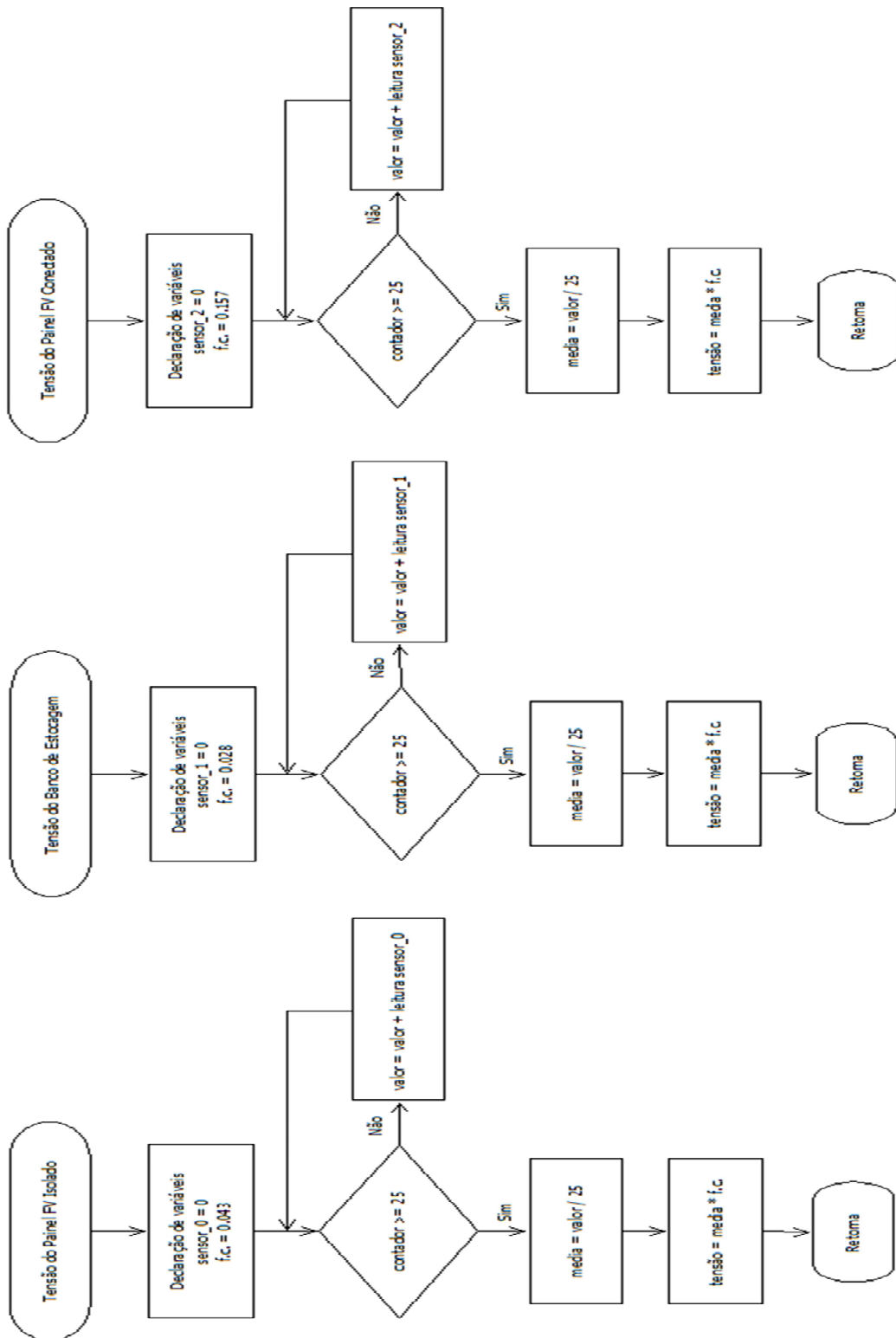
TIBOLA, Leandro Rosniak. **Geração de Sistemas Supervisórios a partir de Modelos Orientados a Objetos**. 2000. 64 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciência da Computação) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2000.

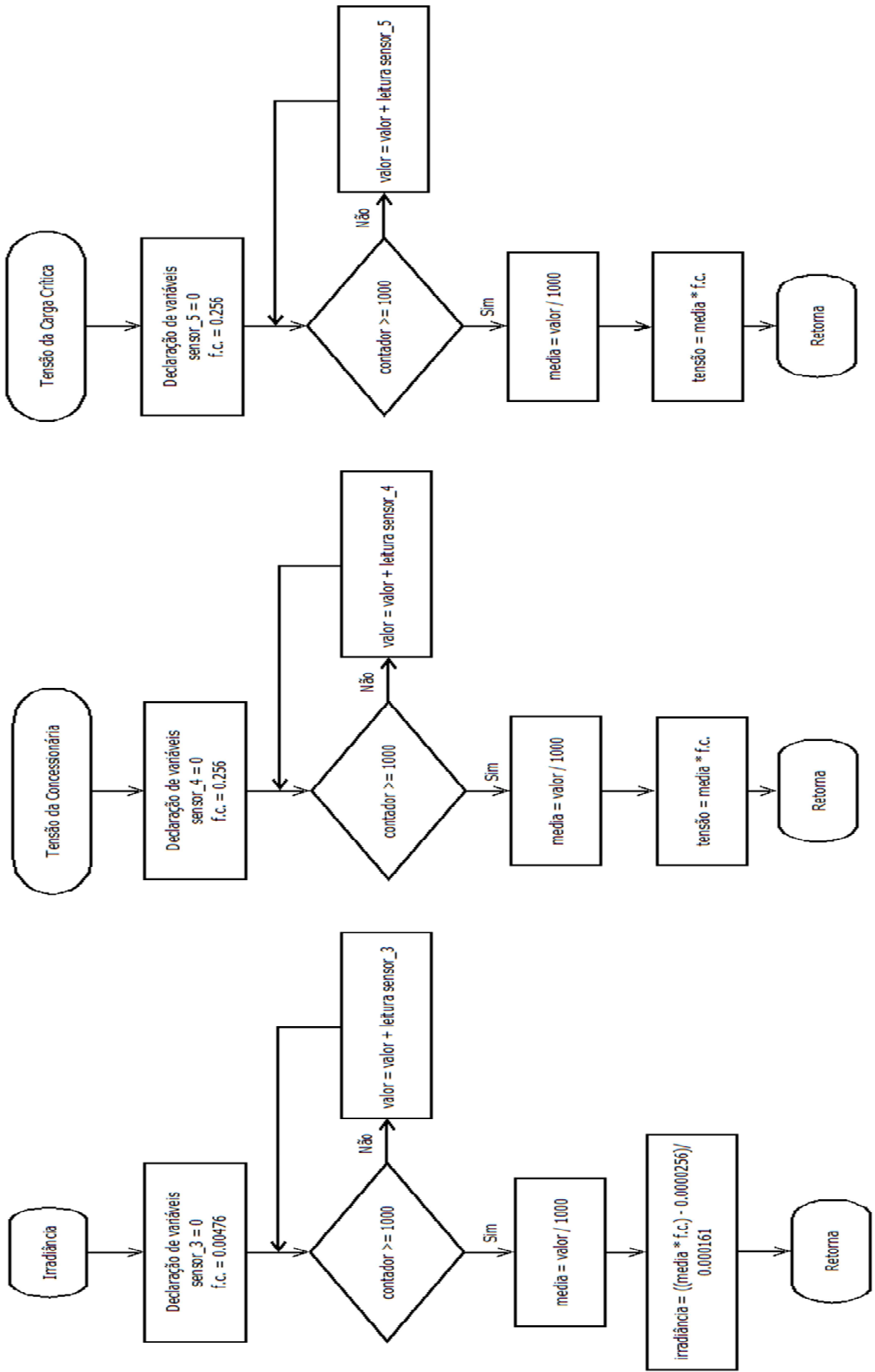
TÜV. (2003). **Design qualification and type approval of PV modules**: Disponível em: http://www.schoenau-ag.de/uploads/media/IEC_61215_61646_EN.pdf> Acesso em: 28 ago 2014.

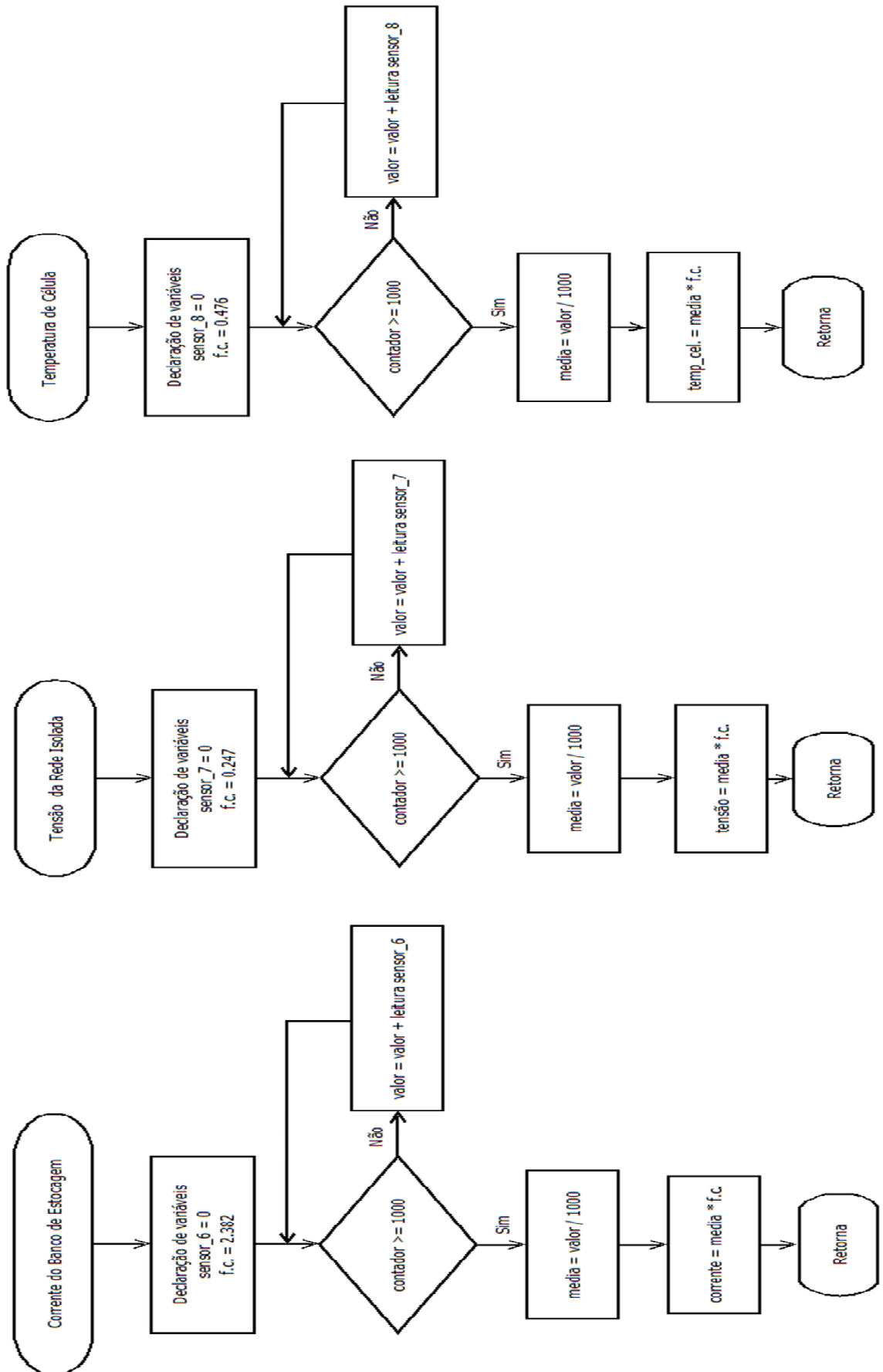
VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1. Ed. São Paulo: Érica, 2012.

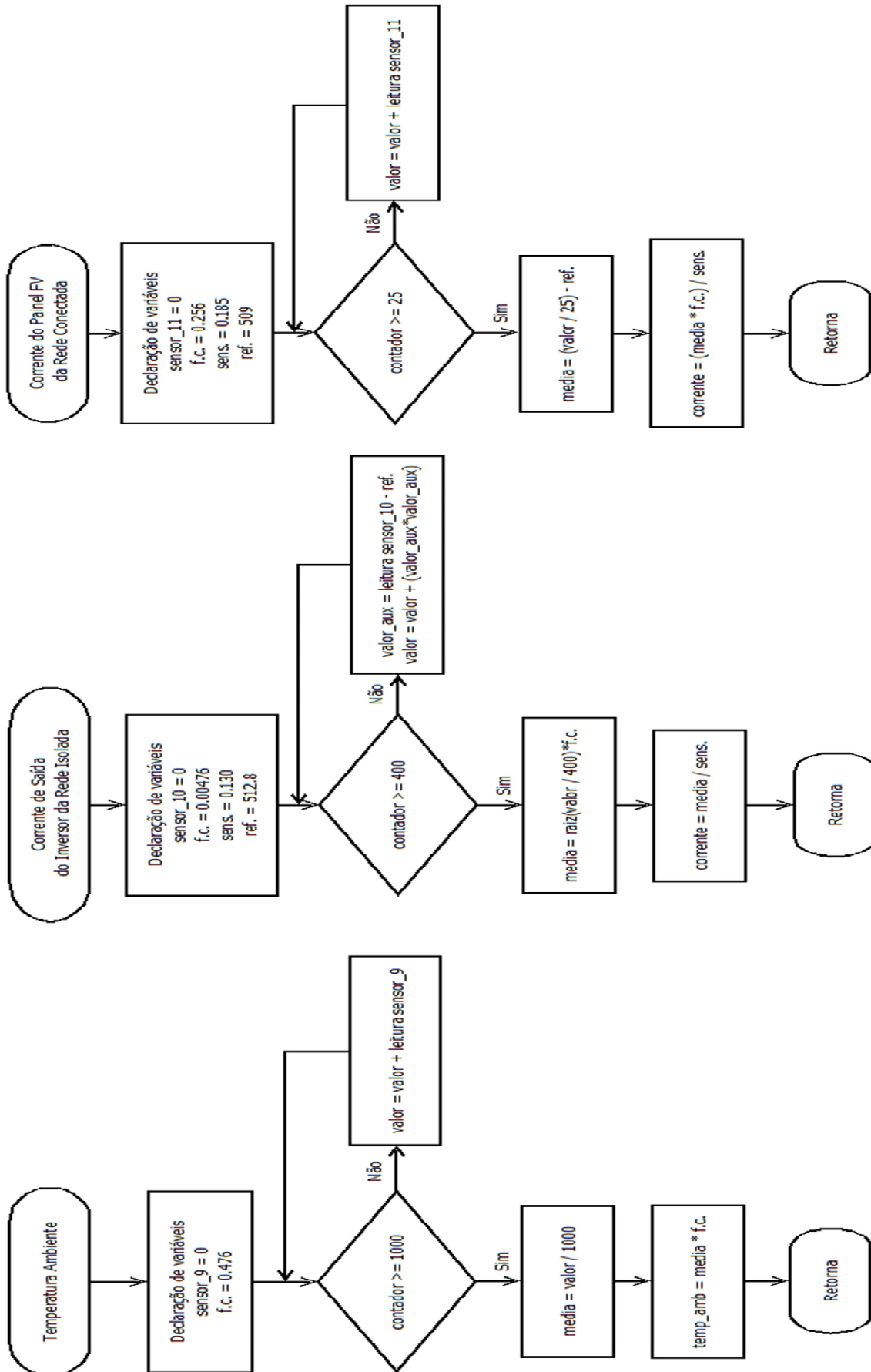
VUOLO, J. H. **Avaliação e Expressão de Incerteza em Medição**. Revista Brasileira de Ensino de Física, 21(3), p. 350 - 358., set. 1999.

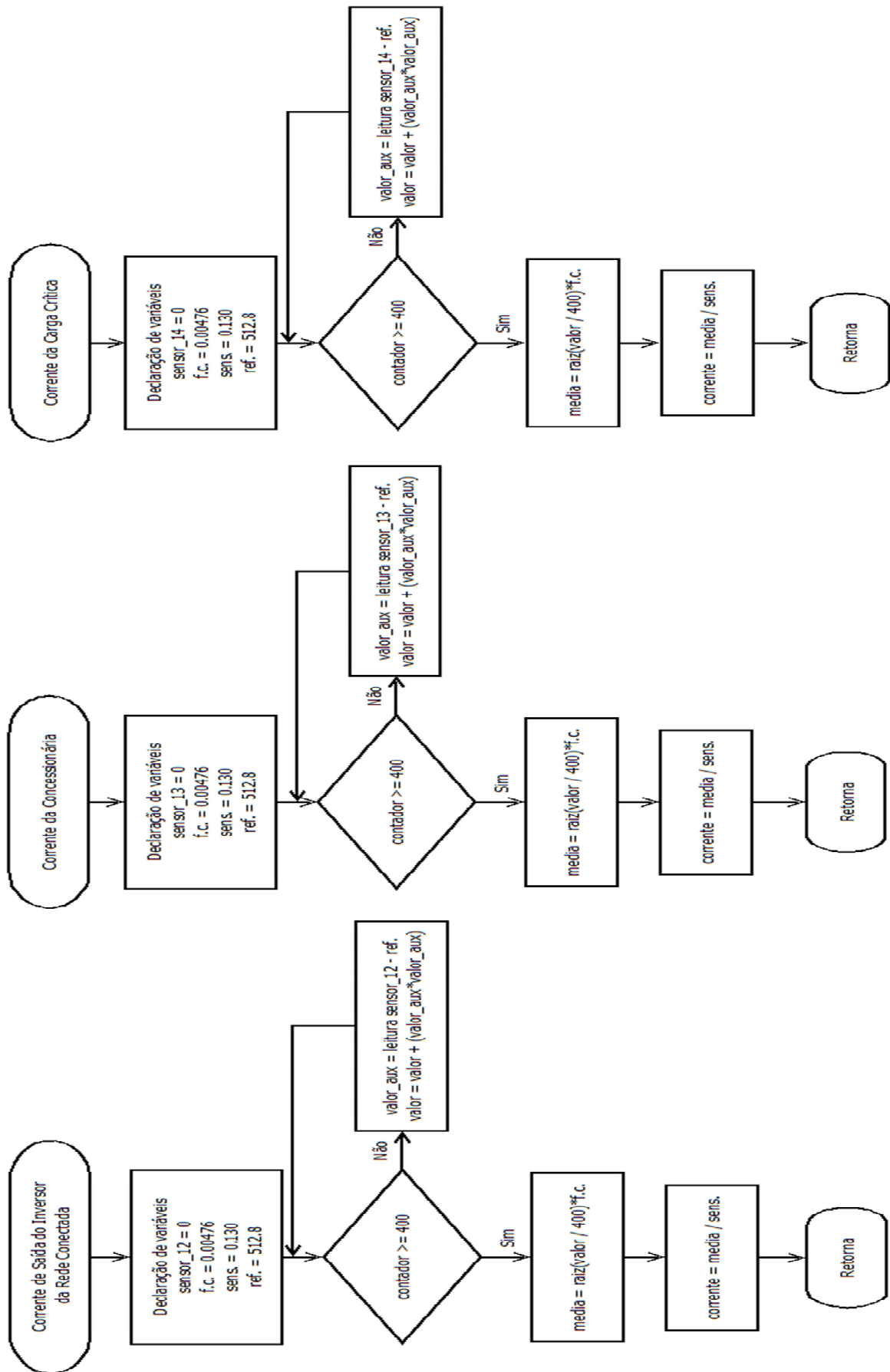
APENDICE A – FLUXOGRAMAS BÁSICOS DAS FUNÇÕES IMPLEMENTADAS

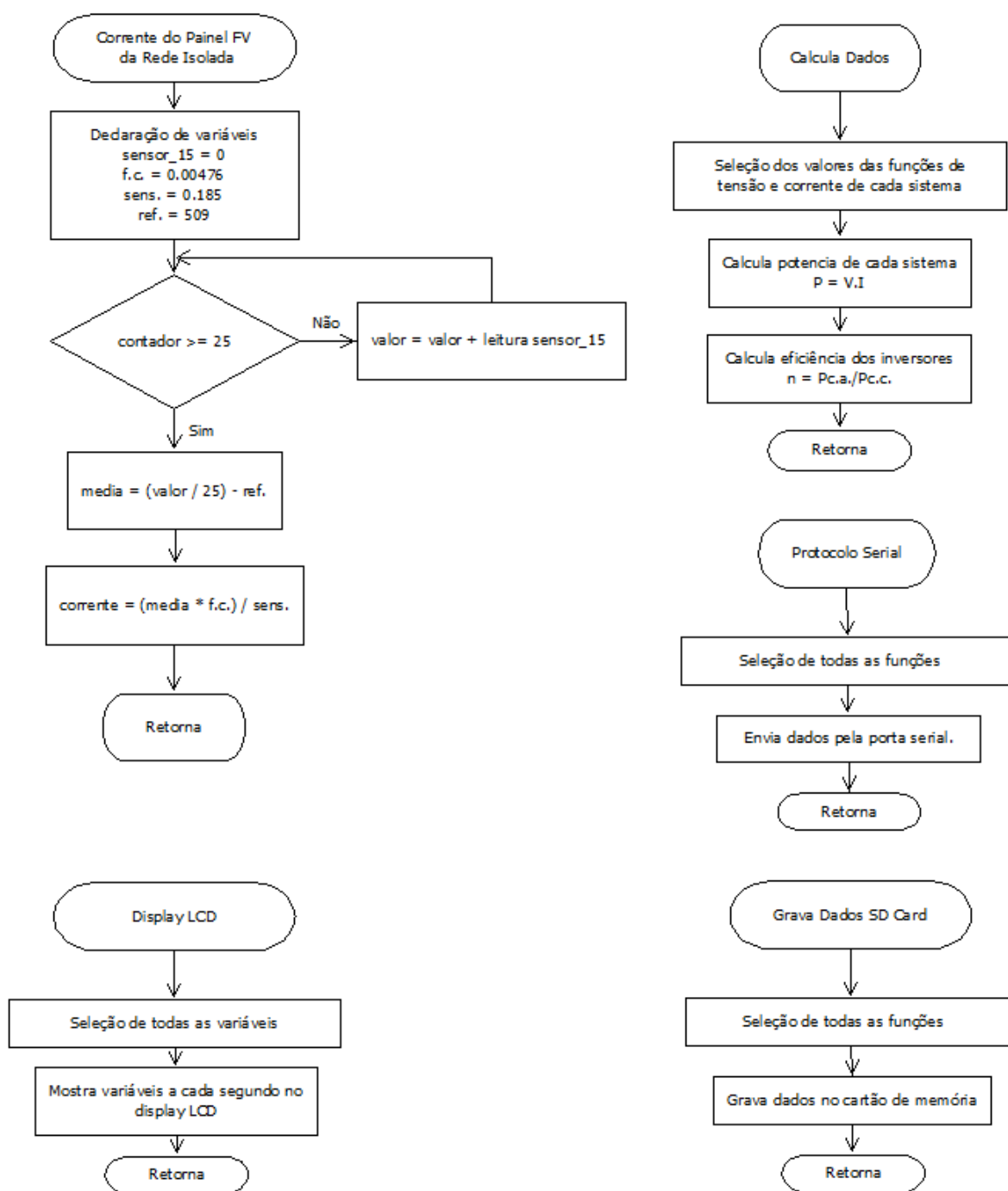












APENDICE B – ALGORITMO COMPLETO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO

```

////////////////////////////////////
//Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica-PPG-EM – UNISINOS
//Mestrando: Ricardo Machado Dias
//Orientador: João Batista Dias
//Programa Supervisório para controle da Microrrede FV 2015/1
////////////////////////////////////

////////////////////////////////////
//Bibliotecas utilizadas //
#include <LiquidCrystal.h>
#include <avr/wdt.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"
#define W5100 10
#define SS_SD_CARD 53
File myFile;
bool selo = HIGH;
RTC_Millis rtc;
LiquidCrystal lcd(8, 7, 6, 5, 3, 2);
////////////////////////////////////
// Variáveis Globais //
unsigned long previousMillis = 0;
unsigned long currentMillis = 0;
const long interval = 60000;
boolean val = 1;
const int pino_rele = 37;
int tela = 0;
float voltsporUnidade = 0.004765625; //0.004794921875;
const byte PS_128 = (1 << ADPS2) | (1 << ADPS1) | (1 << ADPS0);
const byte PS_16 = (1 << ADPS2);
////////////////////////////////////
////Sistema Isolado////
float V_FV_iso = 0; // leitura através do divisor de tensão;
float I_FV_iso = 0; // medida através do sensor de corrente;
float P_FV_iso = 0; // produto dos dois anteriores;
float V_IN_INV_iso = 0; // é a mesma tensão da bateria;
float I_IN_INV_iso = 0; // medida através da eficiência do inversor;
float PCC_INV_iso = 0; // produto dos dois anteriores;
float V_OUT_INV_iso = 0; // medido através do sensor AC;
float I_OUT_INV_iso = 0; // medida através do sensor de corrente;
float PCA_INV_iso = 0; // produto dos dois anteriores;
float EFIC_INV_iso = 0; // de acordo com o manual do fabricante;
float V_bat = 0; // leitura através do divisor de tensão;
float I_bat = 0; //corrente do banco de estocagem
float carga = 0; //carga do banco de estogem;
////Sistema Conectado////
float V_FV_con = 0; // leitura através do divisor de tensão;
float I_FV_con = 0; // medida através do sensor de corrente;
float PCC_con = 0; // produto dos dois anteriores;
float V_con = 0; // medido através do sensor AC;
float I_con = 0; // medida através do sensor de corrente;
float PCA_con = 0; // produto dos dois anteriores;
float EFIC_INV_con = 0; // relação entre as potências de saída de entrada;
////Concessionária////
float V_conces = 0; // medido através do sensor AC;
float I_conces = 0; // medida através do sensor de corrente;
float P_conces = 0; // produto dos dois anteriores;
////Sistema Crítico////
float V_crit = 0; // medido através do sensor AC;
float I_crit = 0; // medida através do sensor de corrente;
float P_crit = 0; // produto dos dois anteriores;
float Energia = 0;

```



```

///Irradiância////////
float irrad =0;          //irradiância;
float Temp_painel = 0;   //temperatura de uma célula do painel;
float Temp_ambiente = 0; //temperatura ambiente;
float corrente_Icc = 0;
float I_cont = 0;
////////////////////////////////////
void tela_0 ()
{
    lcd.clear();
    DateTime now = rtc.now();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("----- UNISINOS -----");
    lcd.setCursor(3,1);
    lcd.print("Data:");
    lcd.print(ArrumaZero (now.day ()));
    lcd.print('/');
    lcd.print(ArrumaZero (now.month()));
    lcd.print('/');
    lcd.print(ArrumaZero (now.year()));
    lcd.print(' ');
    lcd.setCursor(4,2);
    lcd.print("Hora:");
    lcd.print(ArrumaZero (now.hour()));
    lcd.print(':');
    lcd.print(ArrumaZero (now.minute()));
    lcd.print(':');
    lcd.print(ArrumaZero (now.second()));
    lcd.setCursor(0,4);
    lcd.print("-----");
}
String ArrumaZero(int i)
{
    String ret;
    if (i < 10) ret += "0";
    ret += i;
    return ret;
}
////////////////////////////////////
void tela_1()
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("***METEREOLOGIA***");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("TEMP_AMB:");
    lcd.setCursor(12,1);
    lcd.print(Temp_ambiente,2);
    lcd.setCursor(18,1);
    lcd.write(B1101111);
    lcd.print("C");
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("TEMP_CEL:");
    lcd.setCursor(12,2);
    lcd.print(Temp_painel,2);
    lcd.setCursor(18,2);
    lcd.write(B1101111);
    lcd.print("C");
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("IRRAD:");
    lcd.setCursor(8,3);
    lcd.print(irrad,2);
    lcd.setCursor(16,3);
    lcd.print("W/m2");
}
////////////////////////////////////
void tela_2()

```

```

{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("SIST.BACKUP_PainelFV");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("V_FV:");
    lcd.setCursor(13,1);
    lcd.print(V_FV_iso,2);
    lcd.setCursor(19,1);
    lcd.print("V");
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("I_FV:");
    lcd.setCursor(14,2);
    lcd.print(I_FV_iso,2);
    lcd.setCursor(19,2);
    lcd.print("A");
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("P_FV:");
    lcd.setCursor(13,3);
    lcd.print(P_FV_iso,2);
    lcd.setCursor(19,3);
    lcd.print("W");
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void tela_3()
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("SIST.BACKUP_Inversor");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("V_ent_Inv:");
    lcd.setCursor(13,1);
    lcd.print(V_bat,2);
    lcd.setCursor(19,1);
    lcd.print("V");
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("I_ent_Inv:");
    lcd.setCursor(13,2);
    lcd.print(I_IN_INV_iso,2);
    lcd.setCursor(19,2);
    lcd.print("A");
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("P_ent_Inv:");
    lcd.setCursor(12,3);
    lcd.print(PCC_INV_iso,2);
    lcd.setCursor(19,3);
    lcd.print("W");
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void tela_4()
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("SIST.BACKUP_Inversor");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("V_sai_Inv:");
    lcd.setCursor(12,1);
    lcd.print(V_OUT_INV_iso,2);
    lcd.setCursor(19,1);
    lcd.print("V");
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("I_sai_Inv:");
    lcd.setCursor(14,2);
    lcd.print(I_OUT_INV_iso,2);
    lcd.setCursor(19,2);
    lcd.print("A");
}

```

```

        lcd.setCursor(0,3);
        lcd.print("P_sai_Inv:");
        lcd.setCursor(12,3);
        lcd.print(PCA_INV_iso,2);
        lcd.setCursor(19,3);
        lcd.print("W");
    }
    ///////////////////////////////////////////////////////////////////
void tela_5()
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("SIST.BACKUP_Inversor");
    lcd.setCursor(2,1);
    lcd.print("Eficiencia do");
    lcd.setCursor(3,2);
    lcd.print("Inversor = ");
    lcd.setCursor(14,2);
    lcd.print(EFIC_INV_iso,2);
    lcd.setCursor(19,2);
    lcd.print("%");
}
///////////////////////////////////////////////////////////////////
void tela_6()
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("SIST.BACKUP_Baterias");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Tensao_Bat:");
    lcd.setCursor(13,1);
    lcd.print(V_bat,2);
    lcd.setCursor(19,1);
    lcd.print("V");
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("Tensao_min:");
    lcd.setCursor(13,2);
    lcd.print("21.00");
    lcd.setCursor(19,2);
    lcd.print("V");
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("Carga:");
    lcd.setCursor(13,3);
    lcd.print(carga,2);
    lcd.setCursor(19,3);
    lcd.print("%");
}
///////////////////////////////////////////////////////////////////
void tela_7()
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("SIST.CONECT_PainelFV");
    lcd.setCursor(1,1);
    lcd.print("V_FV:");
    lcd.setCursor(12,1);
    lcd.print(V_FV_con,2);
    lcd.setCursor(19,1);
    lcd.print("V");
    lcd.setCursor(1,2);
    lcd.print("I_FV:");
    lcd.setCursor(13,2);
    lcd.print(I_FV_con,2);
    lcd.setCursor(19,2);
    lcd.print("A");
    lcd.setCursor(1,3);
    lcd.print("P_FV:");
}

```

```

        lcd.setCursor(12,3);
        lcd.print(PCC_con,2);
        lcd.setCursor(19,3);
        lcd.print("W");
    }
    ///////////////////////////////////////////////////////////////////
void tela_8()
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("SIST.CONECT_Inversor");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("V_ent_Inv:");
    lcd.setCursor(12,1);
    lcd.print(V_FV_con,2);
    lcd.setCursor(19,1);
    lcd.print("V");
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("I_ent_Inv:");
    lcd.setCursor(13,2);
    lcd.print(I_FV_con,2);
    lcd.setCursor(19,2);
    lcd.print("A");
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("P_ent_Inv:");
    lcd.setCursor(12,3);
    lcd.print(PCC_con,2);
    lcd.setCursor(19,3);
    lcd.print("W");
}
    ///////////////////////////////////////////////////////////////////
void tela_9()
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("SIST.CONECT_Inversor");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("V_Rede:");
    lcd.setCursor(12,1);
    lcd.print(V_conces,2);
    lcd.setCursor(19,1);
    lcd.print("V");
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("I_sai_Inv:");
    lcd.setCursor(13,2);
    lcd.print(I_con,2);
    lcd.setCursor(19,2);
    lcd.print("A");
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("P_sai_Inv:");
    lcd.setCursor(12,3);
    lcd.print(PCA_con,2);
    lcd.setCursor(19,3);
    lcd.print("W");
}
    ///////////////////////////////////////////////////////////////////
void tela_10()
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("SIST.CONECT_Inversor");
    lcd.setCursor(2,1);
    lcd.print(" Eficiencia do");
    lcd.setCursor(3,2);
    lcd.print("Inversor = ");
    lcd.setCursor(14,2);
    lcd.print(EFIC_INV_con,2);
}

```

```

        lcd.setCursor(19,2);
        lcd.print("%");
    }
    ///////////////////////////////////////////////////////////////////
void tela_11()
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("***CARGA CRITICA***");
    lcd.setCursor(2,1);
    lcd.print("Tensao:");
    lcd.setCursor(12,1);
    lcd.print(V_crit,2);
    lcd.setCursor(19,1);
    lcd.print("V");
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("Corrente:");
    lcd.setCursor(14,2);
    lcd.print(I_crit,2);
    lcd.setCursor(19,2);
    lcd.print("A");
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("Potencia:");
    lcd.setCursor(12,3);
    lcd.print(P_crit,2);
    lcd.setCursor(19,3);
    lcd.print("W");
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void tela_12()
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("***CARGA CRITICA***");
    lcd.setCursor(2,1);
    lcd.print("Energia Consumida");
    lcd.setCursor(5,2);
    lcd.print(Energia,2);
    lcd.setCursor(15,2);
    lcd.print("kWh");
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////

void tela_13()
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor (5,0);
    lcd.print("MICRORREDE");
    lcd.setCursor (6,1);
    lcd.print("HIBRIDA");
    lcd.setCursor (3,2);
    lcd.print("COM ESTOCAGEM");
    delay (2000);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor (3,0);
    lcd.print("Programa de Pos");
    lcd.setCursor (4,1);
    lcd.print ("Graduacao em");
    lcd.setCursor (0,2);
    lcd.print ("Engenharia Mecanica");
    lcd.setCursor (6,3);
    lcd.print ("UNISINOS");
    delay (1000);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor (0,0);
}

```



```

double sensor_4 = 0;
for (int i=0; i<1000; i++)
{
    sensor_4 = sensor_4 + analogRead(A4);
}
sensor_4 = sensor_4 /1000;
V_conces = sensor_4 * 0.2515738;
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void tensao_critica_5 ()
{
    double sensor_5 = 0;
    for (int i=0; i<1000; i++)
    {
        sensor_5 = sensor_5 + analogRead(A5);
    }
    sensor_5 = sensor_5 /1000;
    V_crit = sensor_5 * 0.253;
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void i_bat_6 ()
{
    I_cont = (I_FV_iso * V_FV_iso * 0.97) / V_bat;
    I_IN_INV_iso = (V_OUT_INV_iso * I_OUT_INV_iso)/(V_bat * 0.88);
    I_bat = I_IN_INV_iso - I_cont;
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void tensao_backup_7 ()
{
    double sensor_7 = 0;
    for (int i=0; i<1000; i++)
    {
        sensor_7 = sensor_7 + analogRead(A7);
    }
    sensor_7 = sensor_7 /1000;
    V_OUT_INV_iso = sensor_7 * 0.2501846;
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void Temp_painel_8 ()
{
    float sensor_8 = 0;
    for (int i=0; i<1000; i++)
    {
        sensor_8 = sensor_8 + analogRead(A8);
    }
    sensor_8 = sensor_8 /1000;
    Temp_painel = sensor_8*voltsporUnidade*100;
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void Temp_ambiente_9 ()
{
    double sensor_9 = 0;
    for (int i=0; i<1000; i++)
    {
        sensor_9 = sensor_9 + analogRead(A9);
    }
    sensor_9 = sensor_9 /1000;
    Temp_ambiente = sensor_9*voltsporUnidade*100;
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void I_OUT_INV_iso_10()
{
    float sensorValue_aux = 0;
    float sensorValue = 0;
    for(int i=400; i>0; i--)
    {
        sensorValue_aux = (analogRead(A10)-512.8);
    }
}

```



```

int sensor_15 = 0;
for (int i=0; i<25; i++)
{
    sensor_15 = sensor_15 + analogRead(A15);
}
sensor_15 = sensor_15 /25;
I_FV_iso = (((sensor_15-509)*voltsporUnidade)/0.066);
if (I_FV_iso<=0){I_FV_iso = 0;}
}
////////////////////////////////////
void calcula_dados ()
{
    V_IN_INV_iso = V_bat;
    V_con = V_conces;
    P_FV_iso = V_FV_iso*I_FV_iso;
    PCC_INV_iso = V_IN_INV_iso*I_IN_INV_iso;
    PCA_INV_iso = V_OUT_INV_iso*I_OUT_INV_iso;
    EFIC_INV_iso = (PCA_INV_iso/PCC_INV_iso)*100;
    if (EFIC_INV_iso >= 100.0){EFIC_INV_con = 95.0;}
    PCC_con = V_FV_con*I_FV_con;
    if (I_FV_con ==0){PCC_con = 0;}
    PCA_con = V_con*I_con;
    if (I_con ==0){PCA_con = 0;}
    EFIC_INV_con = (PCA_con/PCC_con)*100;
    if (EFIC_INV_con >= 100.0){EFIC_INV_con = 95.0;}
    if (PCA_con == 0 || PCC_con == 0){EFIC_INV_con = 0;}
    P_conces = (V_conces*I_conces);
    P_crit = (V_crit*I_crit);
    carga = (V_bat/27.0)*100;
}
////////////////////////////////////
void escreve_cabecalho ()
{
    if (!SD.begin(SS_SD_CARD)) {return;}
    DateTime now = rtc.now();
    String arq = "";
    arq += now.day();
    arq += now.month();
    arq += now.year();
    arq += ".csv";
    char aq[19];
    arq.toCharArray(aq,19);
    myFile = SD.open(aq, FILE_WRITE);
    if (myFile)
    {
        myFile.print("Data,");
        myFile.print("Hora,");
        myFile.print ("Irrad.,");
        myFile.print ("Temp.Painel,");
        myFile.print ("Temp.Amb.,");
        myFile.print ("P_FV_iso,");
        myFile.print ("V_FV_iso,");
        myFile.print ("I_FV_iso,");
        myFile.print ("PCC_INV_iso,");
        myFile.print ("V_IN_INV_iso,");
        myFile.print ("I_IN_INV_iso,");
        myFile.print ("PCA_INV_iso,");
        myFile.print ("V_OUT_INV_iso,");
        myFile.print ("I_OUT_INV_iso,");
        myFile.print ("EFIC_INV_iso,");
        myFile.print ("V_Bateria,");
        myFile.print ("I_Bateria,");
        myFile.print ("PCC_con,");
        myFile.print ("V_FV_con,");
        myFile.print ("I_FV_con,");
        myFile.print ("PCA_con,");
        myFile.print ("V_con,");
    }
}

```

```

        myFile.print ("I_con,");
        myFile.print ("EFIC_INV_con,");
        myFile.print ("P_conces,");
        myFile.print ("V_conces,");
        myFile.print ("I_conces,");
        myFile.print ("P_crit,");
        myFile.print ("V_crit,");
        myFile.print ("I_crit,");
        myFile.print ("Energia");
        myFile.print ("\n"),
        myFile.close();
    }
}
////////////////////////////////////
void protocolo_serial ()
{
    DateTime now = rtc.now();
    Serial.print(now.day(), DEC);
    Serial.print("/");
    Serial.print(now.month(), DEC);
    Serial.print("/");
    Serial.print(now.year(), DEC);
    Serial.print(',');
    Serial.print(now.hour(), DEC);
    Serial.print(':');
    Serial.print(now.minute(), DEC);
    Serial.print(':');
    Serial.print(now.second(), DEC);
    Serial.print(",");Serial.print (irrad,2);
    Serial.print(","); Serial.print (Temp_painel,2);
    Serial.print(","); Serial.print (Temp_ambiente,2);
    Serial.print(","); Serial.print (P_FV_iso,2);
    Serial.print(","); Serial.print (V_FV_iso,2);
    Serial.print(","); Serial.print (I_FV_iso,2);
    Serial.print(","); Serial.print (PCC_INV_iso,2);
    Serial.print(","); Serial.print (V_IN_INV_iso,2);
    Serial.print(","); Serial.print (I_IN_INV_iso,2);
    Serial.print(","); Serial.print (PCA_INV_iso,2);
    Serial.print(","); Serial.print (V_OUT_INV_iso,2);
    Serial.print(","); Serial.print (I_OUT_INV_iso,2);
    Serial.print(","); Serial.print (EFIC_INV_iso,2);
    Serial.print(","); Serial.print (V_bat,2);
    Serial.print(","); Serial.print (I_bat,2);
    Serial.print(","); Serial.print (PCC_con,2);
    Serial.print(","); Serial.print (V_FV_con,2);
    Serial.print(","); Serial.print (I_FV_con,2);
    Serial.print(","); Serial.print (PCA_con,2);
    Serial.print(","); Serial.print (V_con,2);
    Serial.print(","); Serial.print (I_con,2);
    Serial.print(","); Serial.print (EFIC_INV_con,2);
    Serial.print(","); Serial.print (P_conces,2);
    Serial.print(","); Serial.print (V_conces,2);
    Serial.print(","); Serial.print (I_conces,2);
    Serial.print(","); Serial.print (P_crit,2);
    Serial.print(","); Serial.print (V_crit,2);
    Serial.print(","); Serial.print (I_crit,2);
    Serial.print(","); Serial.print (Energia,2);
    Serial.print("\n");
}
////////////////////////////////////
void escreve_myFile ()
{
    digitalWrite (13,HIGH);
    if (SD.begin(SS_SD_CARD)) {return;}
    DateTime now = rtc.now();
    String arq = "";
    arq += now.day();

```

```

arq += now.month();
arq += now.year();
arq += ".csv";
char aq[19];
arq.toCharArray(aq,19);
myFile = SD.open(aq, FILE_WRITE);
if (myFile)
{
    myFile.print(now.day(), DEC);
    myFile.print('/');
    myFile.print(now.month(), DEC);
    myFile.print('/');
    myFile.print(now.year(), DEC);
    myFile.print(',');
    myFile.print(now.hour(), DEC);
    myFile.print(':');
    myFile.print(now.minute(), DEC);
    myFile.print(':');
    myFile.print(now.second(), DEC);
    myFile.print(",");
    myFile.print(irrad,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(Temp_painel,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(Temp_ambiente,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(P_FV_iso,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(V_FV_iso,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(I_FV_iso,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(PCC_INV_iso,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(V_IN_INV_iso,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(I_IN_INV_iso,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(PCA_INV_iso,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(V_OUT_INV_iso,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(I_OUT_INV_iso,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(EFIC_INV_iso,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(V_bat,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(I_bat,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(PCC_con,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(V_FV_con,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(I_FV_con,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(PCA_con,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(V_con,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(I_con,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(EFIC_INV_con,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(P_conces,2);
    myFile.print(",");
    myFile.print(V_conces,2);
}

```

```

        myFile.print (",");
        myFile.print (I_conces,2);
        myFile.print (",");
        myFile.print (P_crit,2);
        myFile.print (",");
        myFile.print (V_crit,2);
        myFile.print (",");
        myFile.print (I_crit,2);
        myFile.print (",");
        myFile.print (Energia,2);
        myFile.print ("\n"),
        myFile.close();
    }
    Energia = Energia +(P_crit/3600)/1000);
    digitalWrite (13,HIGH);
}
////////////////////////////////////
void telas ()
{
    lcd.noDisplay();
    if (tela<13)
    {
        switch (tela)
        {
            case 0: tela_0();
            break;
            case 1: tela_1();
            break;
            case 2: tela_2();
            break;
            case 3: tela_3();
            break;
            case 4: tela_4();
            break;
            case 5: tela_5();
            break;
            case 6: tela_6();
            break;
            case 7: tela_7();
            break;
            case 8: tela_8();
            break;
            case 9: tela_9();
            break;
            case 10: tela_10();
            break;
            case 11: tela_11();
            break;
            case 12: tela_12();
            break;
        }
    }
    else
    {
        tela = 0;
    }
    lcd.display();
}
////////////////////////////////////
void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    ADCSRA &= ~PS_128;
    ADCSRA |= PS_16;
    lcd.begin(20, 4);
    pinMode (4, OUTPUT);
    pinMode (4, LOW);
}

```

```

pinMode (W5100, OUTPUT);
pinMode (W5100, HIGH);
pinMode (13, OUTPUT);
pinMode (29, INPUT_PULLUP);
pinMode (pino_rele, OUTPUT);
pinMode (pino_rele, HIGH);
pinMode (20, OUTPUT);
pinMode (21, OUTPUT);
Wire.begin();
rtc.begin(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
pinMode(SS_SD_CARD, OUTPUT);
digitalWrite(SS_SD_CARD, HIGH);
delay (50);
digitalWrite(SS_SD_CARD,LOW);
escreve_cabecalho();
wdt_enable(WDTO_8S);
delay (3000);
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void loop()
{
    unsigned long inicio = millis();
    tensao_painelFV1_0 ();
    tensao_bateria_1 ();
    tensao_painelFV2_2 ();
    irradiancia_3 ();
    tensao_conces_4 ();
    tensao_critica_5 ();
    tensao_backup_7 ();
    i_bat_6 ();
    if (V_conces <= 100.0)
    {
        digitalWrite (pino_rele,LOW); // REDE ISOLADA
        V_crit = V_OUT_INV_iso;
    }
    Temp_painel_8 ();
    Temp_ambiente_9 ();
    I_OUT_INV_iso_10();
    I_FV_con_11();
    I_con_12();
    I_conces_13();
    I_crit_14();
    I_FV_iso_15 ();
    calcula_dados ();
    protocolo_serial();
    telas ();
    currentMillis = millis();
    if(currentMillis - previousMillis >= interval)
    {
        digitalWrite (13,HIGH);
        escreve_myFile();
        digitalWrite (13,LOW);
        previousMillis = currentMillis;
    }
    val = digitalRead (29);
    if (val == LOW)
    {
        digitalWrite (13,HIGH);
        tela=tela+1;
        digitalWrite (13,LOW);
    }
    if ( carga>=85.00 && V_conces >=100.00 && selo == LOW)
    {
        digitalWrite (pino_rele,LOW); // REDE ISOLADA
        V_crit = V_OUT_INV_iso;
        selo = HIGH;
    }
}

```

```
if (carga<85.00 && V_conces >=100.00)
{
    digitalWrite (pino_rele, HIGH); // CONCESSIONARIA
    V_crit = V_conces;
}
if (carga>=98.00 && V_conces >=100.00)
{
    selo = LOW;
}
if (V_conces <= 100.0)
{
    digitalWrite (pino_rele,LOW); // REDE ISOLADA
    V_crit = V_OUT_INV_iso;
}
wdt_reset();
}
```