

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
TECNOLOGIAS DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO**

Cristiano Santos Pereira de Abreu

**UM SISTEMA DE CONTROLE DE ENERGIA
SUSTENTÁVEL PARA ABRIGOS DE CULTIVO**

Araranguá

2018

Cristiano Santos Pereira de Abreu

**UM SISTEMA DE CONTROLE DE ENERGIA
SUSTENTÁVEL PARA ABRIGOS DE CULTIVO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Informação e Comunicação da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Tecnologias da Informação e Comunicação. Orientador: Prof. Dr. Anderson Luiz Fernandes Perez

Araranguá

2018

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

Abreu, Cristiano Santos Pereira de
Um Sistema de Controle de Energia Sustentável
para Abrigos de Cultivo / Cristiano Santos Pereira
de Abreu ; orientador, Anderson Luiz Fernandes
Perez, 2018.
100 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Campus Araranguá, Programa de Pós
Graduação em Tecnologias da Informação e Comunicação,
Araranguá, 2018.

Inclui referências.

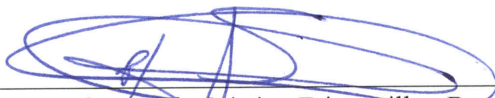
1. Tecnologias da Informação e Comunicação. 2.
Agricultura Inteligente. 3. Cultivo Protegido. 4.
Energias Renováveis. 5. Sustentabilidade. I. Luiz
Fernandes Perez, Anderson. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Tecnologias da Informação e Comunicação. III. Título.

Cristiano Santos Pereira de Abreu

**UM SISTEMA DE CONTROLE DE ENERGIA
SUSTENTÁVEL PARA ABRIGOS DE CULTIVO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Tecnologias da Informação e Comunicação” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Informação e Comunicação.

Araranguá, 01 de Março de 2018.

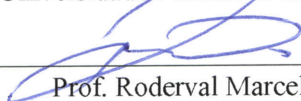


Prof.ª Andrea Cristina Trierweiler, Dr.ª
Coordenadora do Curso

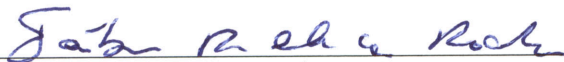
Banca Examinadora:



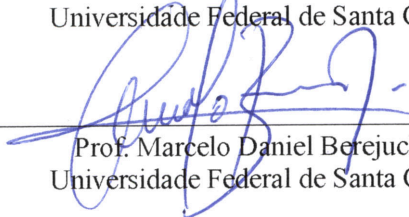
Prof. Anderson Luiz Fernandes Perez, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Roderval Marcelino, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Fábio Rodrigues de la Rocha, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Marcelo Daniel Berejuck, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico esta dissertação aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Darci Pereira de Abreu, *In Memoriam* e Odete Maria Silveira dos Santos pela criação e educação, pelo oferecimento das condições necessárias para a progressão dos meus estudos.

Também deixo um agradecimento muito especial ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Anderson Luiz Fernandes Perez, pela excelente orientação concedida.

Ao Laboratório de Automação e Robótica Móvel - LARM, pela estrutura fornecida para a realização deste trabalho e a toda equipe do laboratório pela amizade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Informação e Comunicação - PPGTIC e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela bolsa de estudos.

A Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Deixo também um agradecimento muito especial para Franciele Carla Wertmann pela amizade, convívio e incentivo na realização deste trabalho.

E demais pessoas que contribuíram diretamente ou indiretamente ao decorrer do mestrado.

Faça o que você pode, com o que você tem, no lugar onde você está.

(Theodore Roosevelt)

RESUMO

Os abrigos para cultivo protegido ou, simplesmente, abrigos de cultivo são estruturas cobertas que podem ser utilizados por agricultores como uma alternativa ao sistema agrícola de campo aberto protegendo a cultura contra as adversidades climáticas e pragas através do controle do microclima no interior do abrigo. Para o êxito na produção com a utilização destes ambientes é preciso realizar um manejo adequado que normalmente é feito com o monitoramento das variáveis do ambiente, tais como temperatura, umidade, luminosidade, e com base nesses parâmetros, o produtor atua no controle da ventilação, sombreamento, irrigação entre outros. Predominantemente esses procedimentos são realizados de forma manual. Os equipamentos responsáveis pelo controle em um abrigo de cultivo são dependentes de energia elétrica e a sua falta comprometerá toda a produção devido à falha no manejo que é fundamental para atender as necessidades fisiológicas do cultivo. O presente trabalho propõe uma arquitetura de um sistema de controle para o fornecimento de energia em abrigos de cultivo que visa auxiliar o agricultor no manejo da sua produção de forma sustentável. Este controle irá operar com energia proveniente de um sistema de energia híbrida desenvolvido com base em três fontes: energia solar fotovoltaica, a concessionária de distribuição de energia e de uma bateria de chumbo-ácido como fonte auxiliar. Estas fontes são controladas por um módulo comutador de energia que preferencialmente opera com o uso da energia solar fotovoltaica conforme a sua disponibilidade. Como metodologia de avaliação a arquitetura proposta foi implementada e testes foram realizados em um mini abrigo de cultivo visando simular um ambiente real que serviu como instrumento de avaliação cujos resultados confirmam a funcionalidade do modelo proposto.

Palavras-chave: Agricultura Inteligente. Cultivo Protegido. Energias Renováveis. Sistema de Automação. Sistemas Híbridos de Energia. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Agricultural greenhouses are covered structures that can be used by farmers as an alternative to conventional farming by protecting the crop against climatic adversities and pests by controlling the microclimate inside the greenhouse. For the successful production with the use of these environments it is necessary to carry out an adequate management that normally is done with the monitoring of the variables of the environment, such as temperature, humidity, luminosity, and based on these parameters, the producer acts in the control of the ventilation, shading, irrigation among others. Predominantly, these procedures are performed manually. The responsible devices for control in a greenhouse is dependent on electricity and its lack will compromise all production due to the failure management that is fundamental to meet the physiological needs of the crop. The present work proposes an architecture of a control system for the supply of energy in agricultural greenhouses that aim to help the farmer in the management of his production in a sustainable way. This control will operate with power from a hybrid power system developed based on three sources: photovoltaic solar energy, energy distribution company and a lead-acid battery as auxiliary power. These sources are controlled by a power switch module which preferably operates with the use of photovoltaic solar energy according to their availability. As evaluation methodology the proposed architecture was implemented and tests were performed in a mini greenhouse to simulate a real environment that served as an evaluation tool whose results confirm the functionality of the proposed model.

Keywords: Automation System. Hybrid Systems. Protected Farming. Renewable Energy. Smart Agriculture. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Cultivo em ambiente protegido instalado na cidade de Turvo - SC.	33
Figura 2	Formatos estruturais para abrigos de cultivo.	35
Figura 3	Exemplo de um abrigo não-climatizado.	36
Figura 4	Exemplo de um abrigo climatizado.	37
Figura 5	Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.	38
Figura 6	Controle <i>on-off</i>	39
Figura 7	Controle com histerese.	40
Figura 8	Diagrama de blocos de um controlador PID.	42
Figura 9	Detalhes de alguns componentes de uma usina hidrelétrica. 47	
Figura 10	Vista panorâmica da Usina Hidrelétrica de Itaipu.	47
Figura 11	Componentes de um aerogerador.	48
Figura 12	Exemplo de um arranjo de painéis fotovoltaicos.	50
Figura 13	Gráfico da potência máxima.	51
Figura 14	Eixos de orientação em painéis fotovoltaicos.	53
Figura 15	Comparação do rendimento de conversão entre um sistema <i>solar tracker</i> e um sistema fixo.	53
Figura 16	Exemplo de um grupo gerador diesel.	54
Figura 17	Elementos de uma célula recarregável.	56
Figura 18	Gráfico das características de vida útil em uso cíclico. ...	58
Figura 19	Gráfico das características de vida útil em flutuação. ...	59
Figura 20	Exemplo de um controlador de carga comercial.	60
Figura 21	Inversores fotovoltaicos <i>grid-tie</i> e <i>off-grid</i>	61
Figura 22	Conversor DC/DC abaixador de tensão (<i>buck</i>) ajustável. 62	
Figura 23	Configuração geral de um sistema híbrido.	64
Figura 24	Integração de módulos semi-transparentes ao telhado de um abrigo.	68
Figura 25	Unidade da Sundrop Farm em Port August - Austrália. 69	
Figura 26	Visão geral da arquitetura do sistema.	72
Figura 27	Fluxograma de funcionamento do MCE.	73
Figura 28	Imagem dos componentes que formam o (<i>gateway</i>).	75
Figura 29	Interface principal do sistema.	75

Figura 30	Arquitetura do MCE.....	77
Figura 31	Imagem do sensor sem fio.....	77
Figura 32	Desenho do mini abrigo em escala 1:8.....	79
Figura 33	Imagem do mini abrigo construído.....	80
Figura 34	Interface da calculadora <i>on-line</i> utilizada para obter o valores da elevação e do azimute.....	82
Figura 35	Estrutura instalada.....	82
Figura 36	Amostra de variação da temperatura e o acionamento da ventilação.....	84
Figura 37	Tensões nas saídas das fontes utilizadas.....	85
Figura 38	Alimentação através da concessionária.....	86
Figura 39	Valores de tensão do painel fotovoltaico.....	86
Figura 40	Valores de tensão da bateria.....	86
Figura 41	Potência gerada pelo painel fotovoltaico e consumida pelo mini abrigo.....	87
Figura 42	Tempo de autonomia da bateria.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Tensões V e V_{oc} em módulos fotovoltaicos.	52
Tabela 2	Soma da potência dos equipamentos.	81
Tabela 3	Características do painel fotovoltaico utilizado.	81
Tabela 4	Tabela de amostras de testes realizados no mini abrigo de cultivo.	83

LISTA DE EQUAÇÕES

1	Função do valor do sinal de controle.	39
2	Equação PID.	41
3	Fórmula da potência máxima.	51
4	Equação para definição do fator forma.	52
5	Cálculo do consumo diário.	65
6	Cálculo da energia gerada pelos painéis fotovoltaicos.	66
7	Cálculo da energia gerada pelos aerogeradores.	66
8	Cálculo da geração diária dos aerogeradores.	67
9	Cálculo da energia do banco de baterias.	67
10	Cálculo do tempo de autonomia do banco de baterias.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Alternating Current</i>
AC/DC	<i>Alternating Current / Direct Current</i>
CI	Circuito Integrado
DC	<i>Direct Current</i>
DHT11	<i>Digital Humidity and Temperature Sensor</i>
DOD	<i>Depth of Discharge</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical</i>
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>
Li-Ion	Lítio-Ion
MCE	Módulo Comutador de Energia
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
NiCd	Níquel Cádmio
NiMH	Níquel-Metal Hidreto
PAR	Radiação Fotossinteticamente Ativa
Pb-ácido	Chumbo-ácido
PD	Proporcional Derivativo
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PRONAF	Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar
SOC	<i>State of Charge</i>
VAC	<i>Voltage Alternating Current</i>
VCC	<i>Voltage Continuous Current</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
\int	Integral
A	Ampere
Ah	Ampere-hora
GHz	Giga-Hertz
I	Corrente elétrica
<i>Imp</i>	Corrente em potência máxima
<i>Isc</i>	Corrente em curto circuito
kWh	Quilowatt-hora
mA	Miliampere
mAh	Miliampere-hora
MW	Megawatts
<i>Pmax</i>	Potência Máxima
V	Volt
<i>Vmp</i>	Tensão de máxima potência
<i>Voc</i>	Tensão em circuito aberto
W	Watt
Wh	Watt-hora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	OBJETIVOS	28
1.1.1	Objetivo Geral	28
1.1.2	Objetivo Específicos	28
1.2	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	29
1.3	ADERÊNCIA AO PPGTIC	30
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	30
2	CULTIVO PROTEGIDO E SUAS TÉCNICAS...	33
2.1	DEFINIÇÃO DE CULTIVO PROTEGIDO	33
2.2	ABRIGOS DE CULTIVO	34
2.2.1	Características de Abrigos de Cultivo	35
2.3	SISTEMA DE CONTROLE	37
2.4	MANEJO DO ABRIGO DE CULTIVO	42
3	FUNDAMENTOS DE ENERGIA RENOVÁVEL E SISTEMAS HÍBRIDOS	45
3.1	GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	45
3.1.1	Energia Hidrelétrica	46
3.1.2	Energia Eólica	48
3.1.3	Energia Solar Fotovoltaica	49
3.1.3.1	Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos	50
3.1.3.2	Orientação de Painéis Fotovoltaicos	52
3.1.4	Grupos Geradores	54
3.1.5	Acumuladores de Energia Elétrica	55
3.1.5.1	Operação e Carga de uma Bateria	58
3.1.6	Sistemas de Condicionamento de Potência	59
3.1.6.1	Controlador de Carga	59
3.1.6.2	Conversores AC/DC	60
3.1.6.3	Inversores de Tensão DC/AC	60
3.1.6.4	Conversores DC/DC	62
3.2	SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIA.....	62
3.2.1	Dimensionamento de Sistemas Híbridos	65
3.2.1.1	Dimensionamento da Carga Diária.....	65
3.2.1.2	Dimensionamento da Fonte Solar	66
3.2.1.3	Dimensionamento da Fonte Eólica	66
3.2.1.4	Dimensionamento do Banco de Baterias	67
3.3	UTILIZAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS E SISTE- MAS HÍBRIDOS EM ABRIGOS DE CULTIVO	67

4	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE SUSTENTÁVEL PARA ABRIGOS DE CULTIVO ...	71
4.1	DESCRIÇÃO LÓGICA DA ARQUITETURA DESENVOLVIDA	71
4.2	DESCRIÇÃO FÍSICA DA ARQUITETURA DESENVOLVIDA	74
4.2.1	Gateway	74
4.2.2	MCE - Módulo Comutador de Energia	76
4.2.3	Sensor Sem Fio	77
5	AVALIAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO	79
5.1	METODOLOGIA EMPREGADA NA AVALIAÇÃO DO SISTEMA	79
5.1.1	Mini Abrigo	79
5.1.2	Dimensionamento da fonte solar e Instalação do MCE	80
5.2	TESTES REALIZADOS NO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO	83
5.3	EXPERIMENTOS REALIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DO MCE	84
5.3.1	Experimento 1 - Análise do Desempenho do MCE	84
5.3.2	Experimento 2 - Teste de Operação com a Bateria	87
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
6.1	TRABALHOS FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

A energia e a agricultura influenciam de forma muito significativa o desenvolvimento do Brasil e são considerados setores muito importantes. Desenvolver uma energia limpa e renovável tornou-se uma das mais importantes tarefas atribuídas à ciência e à engenharia. O consumo de energia bem como o crescimento da população mundial, demandam pesquisas que direcionam avanços científicos em tecnologias para que a geração da energia necessária para a produção de alimentos seja mais sustentável. Além disso, as mudanças climáticas agravadas pela emissão de poluentes, e também a escassez de recursos hídricos, tornam a agricultura tradicional à céu aberto muito vulnerável aos danos causados por intempéries da natureza, abrindo espaço para o cultivo protegido fazendo desta uma técnica interessante para o desenvolvimento do setor agrícola. O cultivo protegido permite conceber um clima favorável (temperatura do ar, umidade relativa e iluminação) para a cultura presente, visando manter um custo operacional mínimo na produção agrícola através de estruturas cobertas chamadas de abrigo de cultivo (HASSANIEN; LI; LIN, 2016).

A produção em abrigos de cultivos está em crescimento no Brasil, pois, além de proteger a cultura das adversidades ambientais e pragas, oferece um microclima favorável proporcionando as condições ideais para o crescimento do cultivo presente permitindo produção durante o ano todo com economia de até 70% no uso de água em relação à agricultura tradicional (NEGOCIOS, 2013). Contudo, o cultivo em abrigos é mais complexo, exigindo experiência do produtor no manejo do ambiente.

O manejo é entendido como o gerenciamento de fatores que influenciam no crescimento e desenvolvimento da cultura com a utilização de instrumentos de controle presentes em um abrigo, tais como janelas, ventiladores, exaustores, cobertura de sombreamento e irrigação (JUNIOR, 2011). Tais instrumentos são dependentes de energia elétrica e a falta dela por períodos extensos poderá comprometer toda a produção (LITJENS et al., 2009).

Para manter a produção em abrigos de cultivo operacional, é fundamental garantir o fornecimento de energia elétrica. Para tanto, é preciso buscar alternativas para assegurar o fornecimento de energia e o uso de fontes renováveis podem ser utilizadas para este fim. Entre as energias renováveis a energia solar e a eólica podem ser utilizadas para cobrir parte ou a totalidade da demanda energética necessária para

aquecimento, refrigeração, iluminação e sombreamento em abrigos de cultivo (VOURDOUBAS, 2016).

A partir das necessidades mencionadas este trabalho visa responder a seguinte pergunta de pesquisa: **é possível desenvolver um sistema de energia híbrida para atender a demanda energética de um abrigo de cultivo automatizado que utiliza três fontes de energia conforme a oferta disponível, tais como: a energia solar fotovoltaica, energia fornecida pela concessionária de distribuição e uma bateria de Pb-ácido (chumbo-ácido) como fonte auxiliar em caso de falhas das duas primeiras fontes, visando a proteção contra as faltas de energia elétrica minimizando o desperdício de recursos para tornar o manejo do cultivo mais sustentável?**

1.1 OBJETIVOS

Esta seção apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma arquitetura de *hardware* e *software* para suprir a demanda de energia elétrica em abrigos de cultivo automatizado através de um sistema de energia híbrida com o aproveitamento de energia solar fotovoltaica e demais fontes necessárias para a realização do manejo de forma sustentável.

1.1.2 Objetivo Específicos

1. Levantar as necessidades existentes na automação do manejo e no fornecimento de energia em abrigos de cultivo.
2. Elaborar uma arquitetura para o controle do manejo em abrigos de cultivo com a utilização de energias renováveis visando proteger a operação do controle com base no levantamento realizado em (1).
3. Implementar a arquitetura proposta em (2).
4. Avaliar a arquitetura implementada em (3) em um mini abrigo de cultivo automatizado utilizado para este fim.

1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O cultivo protegido em abrigos feito com o correto manejo permite que os produtores ofereçam ao mercado produtos de boa qualidade nos períodos de baixa oferta ou fora de época, o que contribui com uma maior rentabilidade para os produtores devido a maior cotação dos preços nesses períodos, justificando o investimento em estruturas de cultivo protegido (HORTALIÇAS, 2015). Entretanto, estes sistemas de produção são dependentes de energia elétrica, em função dos equipamentos que realizam o controle do manejo do abrigo de cultivo como ventiladores, aspersores, bombas de irrigação, entre outros. Um sistema de controle ideal além de realizar o manejo, contribui para a redução dos custos operacionais de produção, incluindo o consumo de energia elétrica (ASSOCIATION et al., 2010).

Devido a alta demanda de energia elétrica na produção em ambientes protegidos que em sua maior parte é realizada em áreas rurais e também considerando as ocorrências de sobretensão, subtensão e oscilações de tensão que são mais frequentes em razão destas áreas ficarem mais distantes da subestação de distribuição do que o consumidor urbano, é fundamental que sejam formas de manter o estado operacional do cultivo protegido visando a integridade das plantas nele presentes (SILVA; MUNHOZ; CORREIA, 2002).

O uso de energias renováveis é uma opção interessante para garantir o fornecimento de energia em territórios rurais afastados, gerando eletricidade localmente e reduzindo a dependência da distribuidora de energia (FADIGAS, 2012). Contudo, existem áreas onde mais de uma fonte renovável como a eólica e solar se destacam, podendo as mesmas serem combinadas com a rede de distribuição da concessionária introduzindo a definição de sistema híbrido de energia, ou simplesmente sistema híbrido (PERILLO, 2013). Um sistema híbrido poderá ser utilizado para alimentar a operação de um abrigo de cultivo, garantindo energia elétrica em caso de faltas de uma ou mais fontes disponíveis no sistema contribuindo com a sustentabilidade da produção agrícola em ambiente protegido.

O Governo Federal do brasileiro vem incentivando o uso das tecnologias de energias renováveis como sistemas híbridos através de programas como o PRONAF - Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar, para que agricultores e produtores rurais familiares financiem até 165 mil reais por ano agrícola para investimentos em tecnologias de energia renovável, tecnologias ambientais, armazenamento hídrico, pequenos aproveitamentos hidroenergéticos, entre ou-

tros a uma taxa de juros de 2,5% ao ano e até três anos de carência (BNDES, 2018). Ações deste tipo contribuem para motivar a utilização de sistemas híbridos de energia na agricultura em geral.

1.3 ADERÊNCIA AO PPGTIC

Este trabalho está inserido na linha de pesquisa Tecnologia Computacional pois utiliza *software* e *hardware* para o desenvolvimento de um sistema que integra automação e gestão de recursos energéticos com fins sustentáveis à ser aplicado na agricultura, sendo assim de natureza interdisciplinar.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Além desta introdução essa dissertação está estruturada em mais cinco capítulos que abordam os seguintes temas:

O **Capítulo 2** abordará os fundamentos de cultivo protegido. Serão descritos as principais funcionalidades e formatos adotados na construção de abrigos. Também abordará os fundamentos de sistemas de controle, os princípios de manejo em abrigos de cultivo e a relação deste com o sistema de controle.

O **Capítulo 3** abordará as principais formas de geração de energia elétrica de forma renovável, bem como o armazenamento de energia. São abordados os principais circuitos para conversão de energia, assim como os sistemas híbridos, que utilizam mais de uma fonte de energia. No final do capítulo são apresentados alguns exemplos do uso de sistemas híbridos de energia em abrigos de cultivo.

No **Capítulo 4** será descrito o sistema de controle proposto apresentando sua arquitetura e os detalhes da sua implementação física. Também serão descritas as estratégias de controle, os materiais e dispositivos utilizados para construir os protótipos de sensores, linguagens de programação e ferramentas utilizadas para desenvolver os softwares de controle.

O **Capítulo 5** descreverá a metodologia empregada e os experimentos realizados na avaliação do sistema proposto.

No **Capítulo 6** são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho, discutindo o resultado das avaliações realizadas. O capítulo também apresentará algumas propostas para trabalhos futuros.

2 CULTIVO PROTEGIDO E SUAS TÉCNICAS

Este capítulo aborda fundamentos de cultivo protegido. São descritos as principais funcionalidades e formatos adotados na construção de abrigos de cultivo. O capítulo também aborda os fundamentos de sistemas de controle, os princípios de manejo em abrigos de cultivo e a relação deste com o sistema de controle.

2.1 DEFINIÇÃO DE CULTIVO PROTEGIDO

O cultivo protegido por si só tem uma definição bastante ampla, pois compreende um conjunto de tecnologias e práticas que visam um cultivo mais seguro e protegido para as mais diversas plantações, como hortaliças, flores e outros congêneres. De modo geral, o cultivo protegido é realizado em abrigos de cultivo ou casas de vegetação, túneis altos, túneis baixos, entre outros. Normalmente são instalados em propriedades rurais ou até mesmo em área urbana com o objetivo principal de proteger a produção de plantas como hortaliças e flores (BERLITZ, 2017). Estas edificações podem ser de diversos tamanhos e materiais, podendo ser construídas de acordo com a necessidade do produtor (STANISZEWSKI, 2016). A Figura 1 apresenta um exemplo de cultivo protegido.

Figura 1 – Cultivo em ambiente protegido instalado na cidade de Turvo - SC.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Um grande empecilho limitador para o sucesso das atividades em cultivo protegido é a falta de conhecimento técnico para o manejo desses ambientes o que traz a necessidade do surgimento de novas soluções tecnológicas e sustentáveis que facilitem o processo produtivo permitindo um controle preciso e eficiente com o objetivo de superar essa falta de conhecimento técnico (VIANA, 2012; PURQUERIO; TIVELLI, 2006).

2.2 ABRIGOS DE CULTIVO

Os abrigos de cultivo são estruturas de madeira ou metal cobertas com plástico translúcido ou vidro permitindo a passagem da iluminação solar formando uma espécie de casa de cultivo (REIS et al., 2005). Esse ambiente oferece um microclima cuja a atmosfera interna se difere da atmosfera externa, o que pode oferecer algumas vantagens em relação ao cultivo tradicional a céu aberto, como proteção das intempéries climáticas (ABREU; BASTOS, 2015), melhor aproveitamento de área para cultivo, pois possibilita um arranjo mais organizado da disposição das plantas, redução do consumo de água e defensivos agrícolas. Contudo, exige um cuidado muito maior no processo de produção sendo que o produtor precisa ficar atento e em constante observação das condições do ambiente, que deve estar de acordo com as necessidades fisiológicas da planta cultivada. O manejo incorreto poderá ocasionar danos irreversíveis ao processo produtivo levando a perda total da safra trazendo grandes prejuízos financeiros (WARMLING, 2014).

O cultivo em abrigos pode oferecer melhor qualidade, barateamento do produto durante a entressafra e o aumento da produção pode ser na ordem de duas a três vezes maior em relação ao cultivo tradicional, já que as culturas não sofrem influência dos fatores negativos presentes no cultivo a céu aberto (OLIVEIRA, 1995) (PURQUERIO; TIVELLI, 2006), além de minimizar o efeito da sazonalidade, contribuindo para uma oferta de produtos mais equilibrada ao longo do ano. Esse benefício é mais evidente em regiões de clima mais frio, já que o calor acumulado no interior do abrigo viabiliza a produção de certas culturas fora de sua época encurtando o ciclo de produção (SILVA; SILVA; PAGIUCA, 2014).

Apesar dos diversos benefícios oferecidos pelo cultivo protegido, a produção em abrigos possuem algumas desvantagens, como o alto custo de implantação, principalmente os que possuem estruturas em metal, a substituição periódica do filme plástico que dura cerca de

três anos, a necessidade de maior conhecimento técnico para o manejo e a falta de recomendação técnica oficial sobre o uso de defensivos e fertilizantes (NETO et al., 2015).

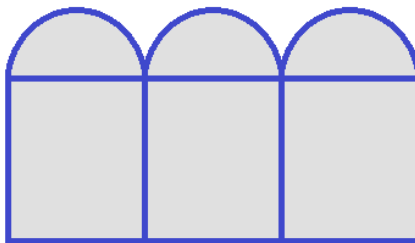
2.2.1 Características de Abrigos de Cultivo

Os abrigos de cultivos podem ser caracterizados pela sua forma estrutural e suas funcionalidades. Os principais formatos estruturais de um abrigo podem ser do modelo arco, capela e serreada podendo ser conjugadas ou não. A Figura 2 ilustra os formatos citados.

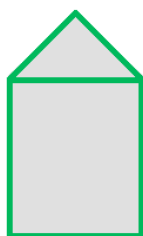
Figura 2 – Formatos estruturais para abrigos de cultivo.



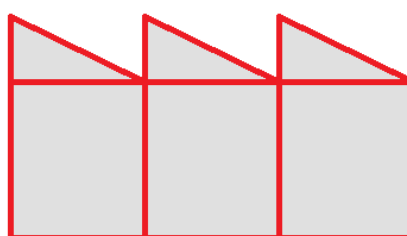
(a) Arco



(b) Arco conjugado



(c) Capela



(d) Serreada

Fonte: Elaborada pelo autor.

Além do formato, os abrigos são classificados conforme as suas funcionalidades, sendo eles do tipo:

Não-climatizado: este tipo de abrigo não possui nenhum tipo de equipamento que atue para modificar o clima em seu interior e não possui demanda de energia elétrica. A sua operação é condicionada aos fatores físicos da própria natureza do ambiente (REIS et al., 2005). A Figura 3 ilustra um exemplo de abrigo não-climatizado onde não existe nenhum tipo de equipamento em seu interior, apenas um estrutura coberta com filme plástico translúcido.

Figura 3 – Exemplo de um abrigo não-climatizado.



Fonte: Agrícolas (2017).

Semi-climatizado: possuem apenas alguns recursos para manipulação do clima como ventiladores, aspersores ou sombreamento onde apenas alguns fatores climáticos são controlados.

Climatizado: são dotados de sistemas mais sofisticados que permitem um amplo monitoramento do microclima e o manejo automatizado de um abrigo, sem a intervenção humana. Normalmente é realizado com a utilização de diversos sensores, atuadores e sistemas de controle (CANSADO, 2003). A Figura 4 ilustra um exemplo de abrigo de cultivo climatizado. É possível notar a presença de equipamentos como ventiladores, sensores e telas de sombreamento no interior do abrigo.

Figura 4 – Exemplo de um abrigo climatizado.



Fonte: Iersel Stephanie Burnett e Thomas (2017).

2.3 SISTEMA DE CONTROLE

Um sistema de controle está fundamentado na combinação de software e hardware integrado ao processo de controle do ambiente (TERUEL, 2010). Genericamente o controle automático utiliza uma malha de realimentação (malha fechada), pela qual cada variável a ser controlada é monitorada e seu valor é comparado com um valor de referência, gerando um sinal de controle que atuará minimizando a diferença entre esses dois valores (CANSADO, 2003) (ARAÚJO; BAYER, 2016).

Estruturalmente, um sistema de controle automático para abrigo de cultivo é constituído pelos seguintes elementos:

Processo: é o abrigo de cultivo como um todo, englobando todas as variáveis a serem controladas.

Perturbações e distúrbios: é um sinal que tende a afetar adversamente o valor da saída do sistema, podendo ser interno quando é gerado pelo sistema, neste caso é definido como perturbação, e externo quando é gerado fora do sistema, neste caso classificado como distúrbio.

Sensores: são os dispositivos que realizam aferições de grandezas físicas gerando um sinal que quando convertido por um controlador fornece o valor da grandeza monitorada. Alguns exemplos são sensores de temperatura, de umidade e de luminosidade.

Variável controlada: variável sobre a qual o controle atua, no sentido de manter um determinado comportamento desejável no processo, também chamada de variável de processo.

Variável manipulada: qualquer variável do processo que causa uma variação na variável controlada.

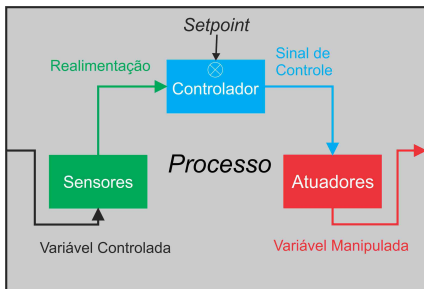
Valor desejado (*setpoint*): é o valor desejado para a variável controlada. O *setpoint* e a variável controlada são expressos nas mesmas unidades.

Controlador: unidade que recebe os valores de cada variável monitorada no instante atual e compara com os valores de (*setpoint*). Através de algum algoritmo de controle o controlador gera os sinais de saída para os atuadores.

Atuadores: dispositivo que atua sobre o meio físico conforme o sinal recebido pelo controlador, visando manter as variáveis controladas dentro dos limites do *setpoint*. Exemplos: exatores, telas de sombreamento, umidificadores, bomba de irrigação, entre outros.

A Figura 5 ilustra um diagrama de blocos para um sistema de controle em malha fechada.

Figura 5 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.

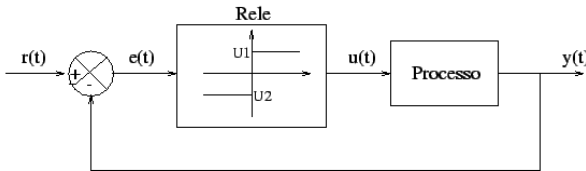


Fonte: Elaborada pelo autor.

Os sistemas automáticos são baseados em algoritmos de controle que podem ser utilizados isoladamente ou associados, sendo eles:

Ação liga-desliga (*on-off*): permite apenas dois estados para o elemento final de controle sendo estes ligado ou desligado. Assim, a variável manipulada é rapidamente alterada para o valor máximo ou o valor mínimo, dependendo se a variável controlada está maior ou menor que o valor desejado (OLIVEIRA, 1999; SILVA; BAZANELLA, 2000). Este tipo de controle pode ser implementado como um simples comparador ligado a um relé físico, conforme o diagrama de blocos apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Controle *on-off*.



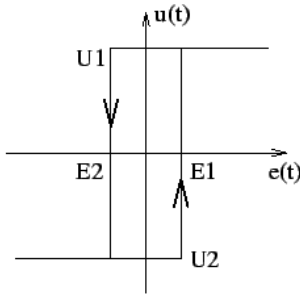
Fonte: SILVA e BAZANELLA (2000).

O sinal de controle $u(t)$ pode assumir o estado $U1$ ou $U2$ conforme o erro $e(t)$ de acordo com a Função 1:

$$u(t) = \begin{cases} U1 & \text{se } e(t) > 0 \\ U2 & \text{se } e(t) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Para evitar a presença de ruídos e chaveamentos espúrios quando o valor do sinal $e(t)$ mantém-se próximo de 0 utiliza-se na prática um controlador liga-desliga com histerese. A Figura 7 ilustra o diagrama desse controlador.

Figura 7 – Controle com histerese.



Fonte: SILVA e BAZANELLA (2000).

Nesse tipo de controlador o comparador compara o sinal de entrada com dois sinais de referência chamados de limite inferior ($E2$) e limite superior ($E1$). Para que ocorra um chaveamento para $U2$ é necessário que o valor de $e(t)$ seja menor que $E2$ e para que haja um chaveamento para $U1$ é preciso que o valor de $e(t)$ seja maior que $E1$. A diferença entre o limite superior e o inferior é chamada de histerese (SILVA; BAZANELLA, 2000).

Ação proporcional (P): esse tipo de ação elimina as oscilações da variável manipulada, tornando o sistema estável, porém não garante que a mesma se encontre no *setpoint*, esse desvio é denominado *off-set*. A ação proporcional trabalha corrigindo o erro do sistema, multiplicando o erro pelo ganho proporcional, dessa forma agindo com uma maior amplitude de correção a fim de manter o equilíbrio do sistema. Assim, sistemas de controle com ação proporcional somente devem ser utilizados nos processos em que grandes variações de carga são incomuns, permitindo pequenas incidências de erros de *off-set* ou em processos com pequenos tempos mortos. Neste último caso, a faixa proporcional pode ser bem pequena (alto ganho) reduzindo o erro de *off-set* (OLIVEIRA, 1999; FREITAS, 2014).

Ação integral (I): atua no processo ao longo do tempo enquanto a diferença entre o valor do *setpoint* e o valor mensurado persistir. O sinal de correção age de forma lenta até eliminar por completo o *off-set*, diferentemente da ação proporcional que corrige os erros instantaneamente. Quanto mais tempo o desvio perdurar, maior será a saída do controlador. A ação integral não é isoladamente uma técnica de controle, pois não pode ser empregada separadamente da ação pro-

porcional, para tanto, faz-se a combinação com a ação proporcional formando um controlador PI (ARAÚJO; BAYER, 2016; MATIAS, 2002).

Ação derivativa (D): tem a função de “antecipar” a ação de controle para que o processo responda mais rapidamente, é dita como antecipatória ou preditiva. Neste caso, o sinal de controle a ser aplicado é proporcional a uma predição da saída do processo. Assim como a ação integral, a ação derivativa deve ser combinada com a ação proporcional constituindo um controlador PD (SILVA; BAZANELLA, 2000).

Controlador PID: é uma associação dos controladores PI e PD, é o controlador mais sofisticado utilizado em sistemas de malha fechada, sendo comumente utilizado na indústria por possibilitar uma boa estabilidade e baixo *off-set*. Este tipo de controlador calcula continuamente um valor de erro $e(t)$ com base no erro medido no ganho proporcional K_p , no ganho integral K_i e no ganho derivativo K_d (OLIVEIRA, 1999; GUERRA, 2009).

$$u(t) = MV = K_p e(t) + K_i \int_0^t e \cdot dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

Em que:

K_p : é o ganho proporcional, um parâmetro de afinação.

K_i : é o ganho integral, um parâmetro de sintonia.

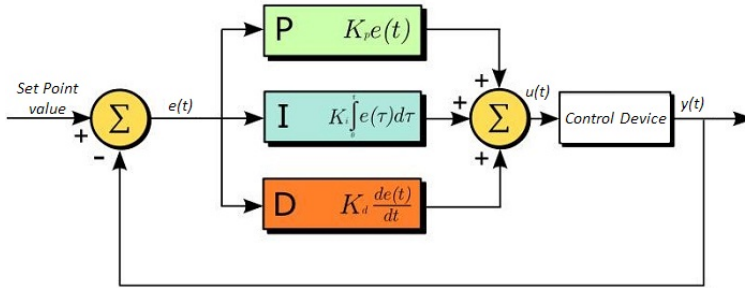
K_d : é o ganho derivado, um parâmetro de sintonia.

$E(t) = SP - PV(t)$: é o erro (SP é o setpoint, e PV (t) é a variável do processo).

t : é o tempo instantâneo (presente).

A Figura 8 apresenta o diagrama de blocos de um controlador PID.

Figura 8 – Diagrama de blocos de um controlador PID.



Fonte: Oliveira e Moreira (2016).

2.4 MANEJO DO ABRIGO DE CULTIVO

Para a realização de produção em ambiente protegido é necessário conhecer muito bem as espécies que serão cultivadas, principalmente quanto às exigências ambientais e nutricionais da planta a ser cultivada (PURQUERIO; TIVELLI, 2006). O correto manejo é fundamental para o desenvolvimento do cultivo, os fatores climáticos como temperatura, umidade e luminosidade podem atuar de forma prejudicial ou favorável no desenvolvimento da planta, portanto, controlar esses fatores é essencial (SANTOS; JÚNIOR; NUNES, 2010). A seguir serão descritos os principais fatores climáticos e suas influências no cultivo em abrigos.

Luminosidade: há três variações para medições da luminosidade: a Radiação Global que mede todo o espectro da luz muito comum para controle de efeito estufa; Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR), utilizado para medir a banda estreita da luz sendo utilizado pelas plantas para realização da fotossíntese e os Medidores de Luz Fotométrico utilizado para diferenciação entre o dia e a noite. A fração da radiação solar que passa pela cobertura do abrigo se difunde mais do que em campo aberto, atingindo com maior eficiência as folhas do cultivo, local onde é realizada a fotossíntese (JUNIOR, 2016).

Temperatura: é uma das principais variáveis a ser controlada devido a sua influência direta nas funções vitais da planta, da germinação até a frutificação.

Umidade relativa do ar: controlar a umidade é essencial para evitar o aparecimento de doenças e contribuir na absorção de nutrientes favorecendo o crescimento da planta.

CO₂: a verificação do volume de dióxido de carbono no interior do abrigo serve para análise do processo de fotossíntese da planta (ASSOCIATION et al., 2010).

Além dos fatores climáticos, o manejo inclui a correta adubação do solo e a irrigação, sendo atividade obrigatória e intensiva nos ambientes protegidos. Em virtude das alterações do ambiente no interior de um abrigo, a cultura se desenvolverá de forma diferenciada em relação ao cultivo tradicional e a adoção de um método adequado de manejo é fundamental para o êxito do empreendimento (MOREIRA, 2002).

O controle de cada equipamento do abrigo é essencial para facilitar o manejo. Um sistema totalmente integrado gerenciado por softwares pode monitorar e controlar todos os aspectos do microclima simultaneamente 24 horas por dia e 7 dias por semana reduzindo consideravelmente os erros humanos e a probabilidade de que alguma tarefa não seja executada comparado com o mesmo processo realizado manualmente. Uma das funções mais importantes que um sistema de controle pode oferecer são as informações adicionais fornecidas por relatórios e disponibilizados para os produtores, permitindo que eles tomem melhores decisões de gerenciamento e com isso, passem mais tempo gerenciando o processo e preocupando-se menos com as tarefas operacionais (ASSOCIATION et al., 2010; ROECK; SILVA et al., 2016).

3 FUNDAMENTOS DE ENERGIA RENOVÁVEL E SISTEMAS HÍBRIDOS

Este capítulo aborda as principais formas de geração de energia elétrica de forma renovável, bem como o armazenamento de energia. São abordados os principais circuitos para conversão de energia, assim como os sistemas híbridos, que utilizam mais de uma fonte de energia. No final do capítulo são apresentados alguns exemplos do uso de sistemas híbridos de energia em abrigos de cultivo.

3.1 GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A energia pode ser definida como o potencial para a realização de determinado trabalho ou uma ação que pode ser exemplificada no consumo de energia em todas as atividades que o ser humano exerce. Percebe-se que desde sempre o Homem necessitou de energia para a sua sobrevivência. O Sol é o responsável por grande parte da energia que chega à Terra. A quantidade de energia que é emitida pelo Sol chega à superfície terrestre por meio da radiação de ondas (AGUIAR et al., 2012) e está indiretamente ligada em todas as fontes de energia utilizadas pelo homem tais como, combustíveis fósseis, biomassa, eólica e a energia marítima sendo essencial para a sobrevivência humana.

A alta dependência de recursos primários como os combustíveis fósseis, na ordem dos 82% em nível mundial (PÉREZ-NAVARRO et al., 2016), obriga o Homem a ampliar a geração de energia a partir de fontes inesgotáveis devido à escassez desses recursos primários e seu alto impacto ambiental. A obtenção de energia considerada limpa, deu origem ao termo “fontes renováveis de energia”. O termo “renovável” está relacionado com o desenvolvimento sustentável do planeta, no qual esforços e planejamento devem ser tomados para servir as necessidades humanas sem comprometer as gerações futuras (AGUIAR et al., 2012).

As principais fontes renováveis de energia (hídrica, eólica, solar e biocombustíveis) podem em um futuro próximo, substituir os combustíveis fósseis e minimizar os danos causados por esses tipos de combustíveis responsáveis pelos fatores causadores das crises ambientais. As fontes renováveis provêm do fluxo de energia proveniente do sol que abastece a Terra diariamente. Estima-se que o sol ainda irá durar pelo menos 4,5 bilhões de anos. Este fluxo diário de energia é pelo menos dez mil vezes maior do que a energia utilizada em todo o planeta incluindo

a energia mais fundamental de todas que são os alimentos. Mesmo que a humanidade utilizasse apenas 1% da energia proveniente do sol, ainda haveria disponível uma oferta 100 vezes maior do que a utilizada nos dias de hoje (SILVA, 2007).

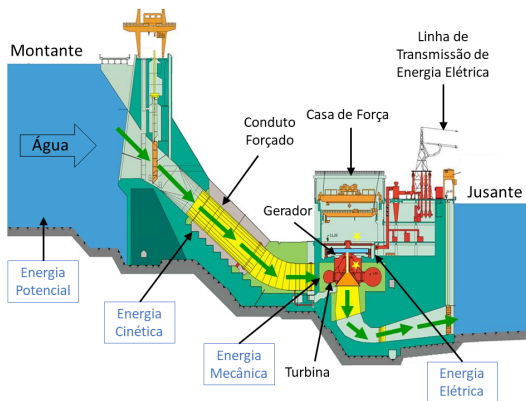
A seguir serão fundamentadas as principais formas de geração de energia elétrica com base em fontes renováveis e sistemas de condicionamento de potência.

3.1.1 Energia Hidrelétrica

A geração de energia elétrica de procedência hidráulica está entre as mais utilizadas em todo o mundo. Usinas hidrelétricas são a segunda fonte de energia elétrica mais importante do planeta, representando cerca de 20% de toda a eletricidade produzida na Terra. O Brasil está no grupo de países em que a produção de eletricidade é predominantemente oriundas de usinas hidrelétricas. Essas usinas correspondem a 75% da potência instalada no país (ENERGÉTICA, 2007).

A energia hidráulica provém da irradiação solar e da energia potencial gravitacional. O sol e a força da gravidade condicionam a evaporação, a condensação e a precipitação da água sobre a superfície da Terra, a produção de energia é feita a partir do aproveitamento do fluxo de um curso de água, através da utilização da vazão do rio, quantidade de água disponível em um determinado período de tempo, com os seus desníveis, sejam os naturalmente formados, como as quedas de água ou os criados com a construção de barragens. Assim, a potência hidráulica disponível em determinado local de um rio é dada pelo produto da vazão, a altura existente entre o reservatório (montante), sistema de descarga (jusante da barragem), e a aceleração da gravidade (ENERGÉTICA, 2007). A gravidade faz água fluir ao longo do leito do rio e este movimento contém energia cinética, que pode ser convertida em energia mecânica e esta em energia elétrica nas centrais hidrelétricas. A hidroeletricidade é, assim, considerada uma energia renovável. A Figura 9 ilustra os detalhes de alguns componentes de uma usina hidrelétrica para o melhor entendimento dos termos utilizados e dos processos de conversão e geração de energia elétrica.

Figura 9 – Detalhes de alguns componentes de uma usina hidrelétrica.



Fonte: Adaptado de Abreu (2015).

Uma usina hidrelétrica é composta basicamente por uma barragem, sistemas de captação e adução de água, casa de força e vertedouros. Cada uma dessas partes demanda obras e instalações que devem ser projetadas para um funcionamento conjunto (ANEEL, 2008). Um exemplo desse tipo de barragem é o da Usina Hidrelétrica de Itaipu que possui 20 unidades geradoras, cada uma com capacidade de geração de 700 MW, potência suficiente para abastecer uma cidade com 1,5 milhão de habitantes. Juntas, as 20 unidades geradoras somam 14,000 MW (BINACIONAL, 2017). A Figura 10 apresenta uma vista panorâmica da Usina de Itaipu.

Figura 10 – Vista panorâmica da Usina Hidrelétrica de Itaipu.



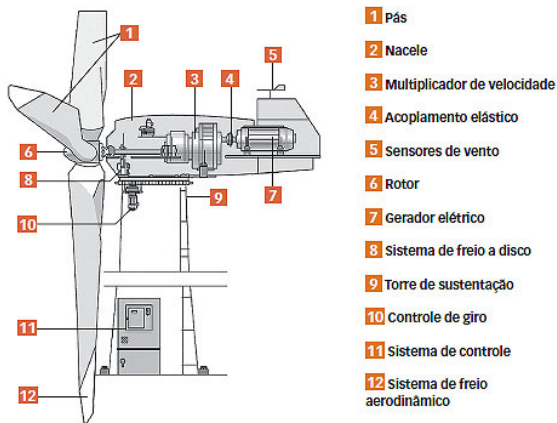
Fonte: Eletrobras (2017).

3.1.2 Energia Eólica

A energia eólica é proveniente da força dos ventos que são gerados com o aquecimento não uniforme da terra pelos raios solares somado ao movimento de rotação da Terra originando o movimento de massas de ar. A principal característica do vento a ser analisada quando se visa o aproveitamento eólico para geração de eletricidade é a velocidade. A potência contida no vento é proporcional ao cubo de sua velocidade, tornando evidente a importância deste parâmetro em projetos de sistemas eólicos (PINHO et al., 2008).

A obtenção de energia elétrica se dá com a utilização de aerogeradores que é um componente do sistema eólico que faz a conversão da energia cinética, contida nos ventos, em energia mecânica pelo giro das pás do rotor e em seguida é transformada em energia elétrica pelo gerador (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008). O aerogerador também pode ser chamado de turbina eólica e é constituído por vários componentes. A Figura 11 apresenta os principais componentes de um aerogerador.

Figura 11 – Componentes de um aerogerador.



Fonte: PINI (2017).

Atualmente a maioria das turbinas eólicas em uso nos parques eólicos apresenta eixo de rotação na posição horizontal. As pás da turbina de eixo horizontal são fixadas por meio de flanges, em uma estrutura metálica denominada de cubo. Juntas, as pás e o cubo formam o rotor eólico do aerogerador. As pás podem ser entendidas como

motores a vento, pois são elas que interagem diretamente com o vento. A interação entre as pás de uma turbina eólica com os ventos que passam através da área do rotor deve ser a maior possível, de modo que a extração de potência seja a mais eficiente possível (RODRIGUES; REIS; BARRETO, 2016).

3.1.3 Energia Solar Fotovoltaica

O efeito fotovoltaico foi observado por Edmond Becquerel em 1839 e consiste na diferença de potencial entre os extremos de um semicondutor durante exposição de luz visível (SOUZA, 2012). A radiação solar pode ser convertida diretamente em eletricidade com a utilização de células fotovoltaicas, sendo considerada uma fonte limpa e inesgotável de energia (FADIGAS, 2012). Em geral, essas células são fabricadas de silício monocristalino, policristalino ou amorfo. São classificadas como células cristalinas ou de filme fino. As células monocristalinas comerciais têm eficiência em torno de 18%. As células policristalinas são as mais populares, possuindo eficiência média de 14%. As células de filme fino têm um custo de fabricação potencialmente mais baixo que as cristalinas, embora sua eficiência varie entre 7 e 13% (GAIO; TOFOLI; JR, 2010).

Uma única célula fotovoltaica tem a capacidade de produção típica entre 1 e 2 W, isso corresponde a uma tensão de 0,5 V e uma corrente entre 2 e 4 A. Para obter determinados níveis de tensão e corrente, se faz necessário a associação de células fotovoltaicas através de ligações em série e/ou paralelo formando assim um painel fotovoltaico ou módulo fotovoltaico (SEGUEL, 2009).

Os módulos fotovoltaicos diferem entre si por vários fatores, como a capacidade de gerar potencial, chamado de potência-pico, fator de forma, área, etc. E esses valores se alteram de acordo com o tipo de célula fotovoltaica utilizada, e assim, como as células em um módulo, os painéis também podem ser associados em série e/ou paralelo, formando assim um arranjo que deve ser configurado de acordo com a demanda necessária (SOLAR, 2014).

A energia proveniente de arranjos fotovoltaicos pode ser empregada tanto em sistemas autônomos (independentes, não conectados à rede elétrica) quanto em sistemas interligados à rede (cogeração de energia). No entanto a energia em sua saída é irregular devido às variações da intensidade luminosa do sol durante o dia, sendo totalmente inadequada para aplicações diretas. Desse modo, é fundamentalmente

necessário o tratamento e o processamento dessa energia, com o objetivo de disponibilizá-la para os diferentes tipos de aplicações (GAIO; TOFOLI; JR, 2010). A Figura 12 ilustra um arranjo de painéis fotovoltaicos utilizados para produção de energia elétrica.

Figura 12 – Exemplo de um arranjo de painéis fotovoltaicos.



Fonte: Eletrobras (2017).

3.1.3.1 Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos

A seguir são definidas algumas características elétricas dos módulos fotovoltaicos:

Tensão Nominal: é a tensão padrão no qual o módulo opera. A quantidade de células determina esse parâmetro.

Tensão de Máxima Potência (V_{mp}): é a tensão máxima que o módulo irá alcançar em seu ponto de máxima potência.

Tensão em Circuito Aberto (V_{oc}): é a tensão máxima que o módulo alcança em seus terminais com a ausência de carga.

Corrente em Potência Máxima (I_{mp}): corrente máxima que um módulo fotovoltaico pode fornecer a uma carga.

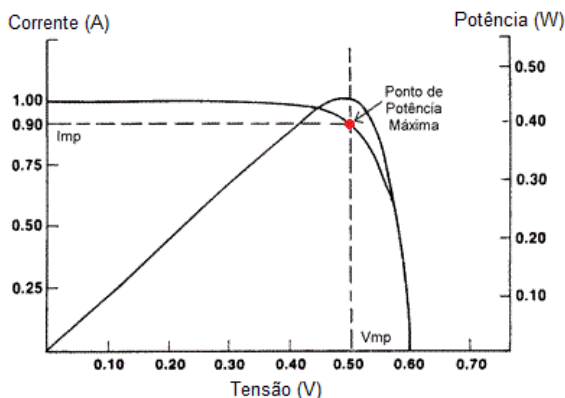
Corrente em Curto Circuito (I_{sc}): corrente máxima que o módulo fornece quando seus terminais estão em curto circuito. Diferentemente de outras fontes de energia, pode-se medir a corrente em curto circuito e, geralmente é 5% superior à corrente máxima.

Potência Máxima (P_{max}): a corrente elétrica gerada por um módulo varia de zero ao I_{sc} , enquanto a tensão entre os terminais varia de zero até o V_{oc} sob diferentes condições de irradiância e temperatura. Como a potência é o produto da tensão pela corrente, essa só será a máxima para uma única combinação de tensão e corrente. Um módulo fotovoltaico estará fornecendo a máxima potência quando o circuito externo possuir uma resistência tal que determine os valores máximos de tensão e corrente e, portanto, o seu produto será o máximo. Existem aparelhos que conseguem alcançar o ponto de máxima potência (MPP - *Maximum Power Point*) em diversas condições de irradiância e temperatura. A potência máxima pode ser calculada a partir da Equação 3.

$$P_{max} = I_{mp} \cdot V_{mp} \quad (3)$$

O gráfico representado na Figura 13 apresenta o ponto de potência máxima de uma célula fotovoltaica.

Figura 13 – Gráfico da potência máxima.



Fonte: CRESESB (2017).

Eficiência: é o quociente entre a potência gerada e a irradiância incidente sobre o módulo.

Fator de Forma (preenchimento): é um conceito teórico que mede a forma da curva definida pelas variáveis I_{mp} , V_{mp} , I_{sc} e V_{oc} .

Quanto melhor a qualidade das células no módulo, mais próxima da forma retangular será esta curva. O fator de forma de um painel fotovoltaico é calculado com a Equação 4:

$$FF = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} = \frac{P_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (4)$$

A Tabela 1 apresenta os valores típicos das tensões nominais V e tensões em circuito aberto V_{oc} em módulos fotovoltaicos.

Tabela 1 – Tensões V e V_{oc} em módulos fotovoltaicos.

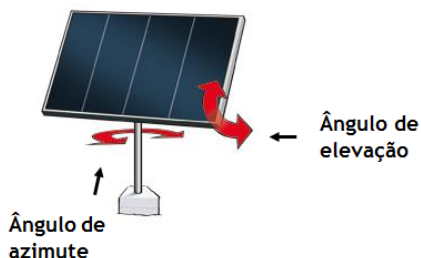
Número de Células	Tensão Nominal	Tensão em Circuito Aberto (V_{oc})
18	6 V	9,2 V
36	12 V	17,4 V
72	24 V	40,15 V

3.1.3.2 Orientação de Painéis Fotovoltaicos

A orientação dos painéis fotovoltaicos tem impacto direto no rendimento da geração de energia, esta orientação diz respeito ao ângulo vertical (elevação) e ao ângulo no eixo do plano horizontal (azimute). Um direcionamento inadequado de um painel fotovoltaico causa perdas na conversão de energia elétrica em virtude da menor incidência solar decorrente do desalinhamento do painel com o sol (RIBEIRO et al., 2006; TREVELIN et al., 2014).

A orientação dos painéis pode ser feita através de um sistema de posicionamento com rastreamento solar (*solar tracker*) ou por sistemas de posicionamento fixo. Nos sistemas com rastreamento solar os painéis acompanham o sol durante todo o período de incidência solar, atuando para que a face do painel fotovoltaico seja sempre perpendicular à incidência dos raios solares, promovendo o aumento na conversão de energia. Isto é possível através de motores que são instalados junto ao suporte do painel e realizam os movimentos de rastreamento (ALVES, 2008; ANTÔNIO; RIBEIRO; PEREIRA, 2014), como os ilustrados na Figura 14 cujas setas indicam as direções dos movimentos para ajuste dos ângulos de azimute e elevação para a orientação de um painel fotovoltaico.

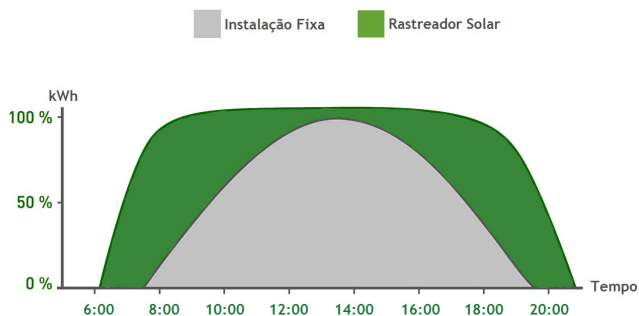
Figura 14 – Eixos de orientação em painéis fotovoltaicos.



Fonte: Adaptado de Choice (2010).

Nos sistemas fixos os painéis permanecem imóveis e devem ser posicionados corretamente durante o processo de instalação, entretanto com um posicionamento otimizado é possível fazer um bom aproveitamento da incidência solar, ainda que seja necessário fazer um estudo da região de instalação, pois as variações de altitude, relevo, e coordenadas geográficas possuem relação direta com o ajuste da orientação dos painéis. A Figura 15 apresenta uma comparação de rendimento de conversão de energia entre os sistemas de posicionamento *solar tracker* e de posicionamento fixo.

Figura 15 – Comparação do rendimento de conversão entre um sistema *solar tracker* e um sistema fixo.



Fonte: Adaptado de Greenpower (2015).

Devido a sua dinâmica que permite o aumento da exposição di-

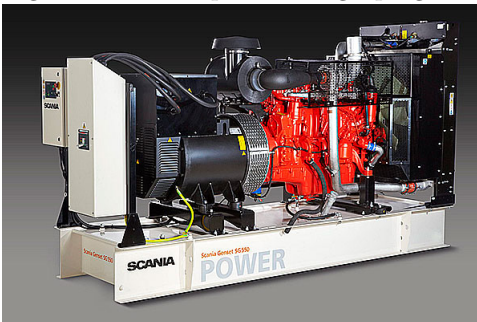
reta dos painéis com os raios solares, os sistemas de posicionamento *solar trackers* podem ser até 45% mais eficientes que os sistemas de posicionamento fixo (PASSOS, 2017).

3.1.4 Grupos Geradores

Um conjunto composto por um motor e um gerador elétrico de corrente alternada acoplados em uma plataforma comum para fornecimento de energia elétrica denomina-se grupo gerador (PINHO et al., 2008). Os grupos geradores são muito utilizados em lugares onde o acesso à rede elétrica é economicamente inviável. É usado também como suprimento auxiliar em lugares como hospitais, supermercados, aeroportos onde o fornecimento de energia não pode ser interrompido.

Os grupos geradores utilizam motores de combustão interna geralmente à diesel ou gasolina, o motor converte a energia da combustão em energia cinética de rotação. Esta energia é aplicada ao eixo do gerador elétrico convertendo a rotação em energia elétrica. A Figura 16 ilustra um exemplo de grupo gerador diesel.

Figura 16 – Exemplo de um grupo gerador diesel.



Fonte: Energia (2017).

Atualmente os grupos geradores vêm sendo aplicados juntamente com as fontes de energias alternativas, tais como solar e eólica, compondo os chamados sistemas híbridos (PINHO et al., 2008).

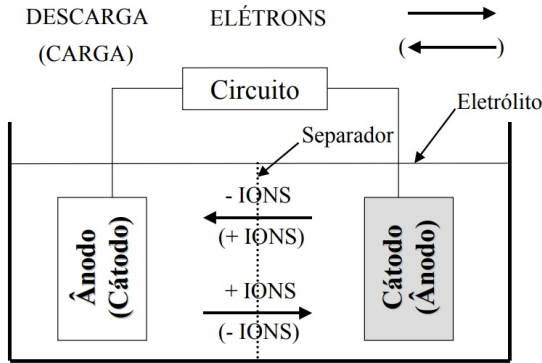
3.1.5 Acumuladores de Energia Elétrica

A natureza das fontes renováveis solar e eólica é intrinsecamente variável no tempo, nos ciclos diários, nas estações do ano e nas variações aleatórias da atmosfera. Como consequência disso, são muitos os momentos nos quais a potência elétrica que pode ser entregue pelos elementos renováveis difere, por excesso ou por déficit, daquela demandada para uma determinada aplicação. No caso particular dos sistemas isolados de energia renovável, sendo híbrido ou não, exigem o armazenamento de energia nos momentos em que a produção excede a demanda, para ser utilizada em uma situação inversa, quando não há geração da parte renovável.

Denomina-se de sistema de armazenamento a parte do sistema que se encarrega de realizar tal função. Historicamente, o sistema de armazenamento mais utilizado em sistemas isolados e híbridos é aquele constituído por acumuladores eletroquímicos (ou baterias) de Pb-ácido (PINHO et al., 2008).

Essencialmente os acumuladores de energia elétrica, também chamados de baterias operam pelo processo de reação química de oxidação e redução. A oxidação é o processo de liberação de elétrons e a redução é o processo de consumo de elétrons. Uma bateria é composta por quatro elementos básicos: o ânodo feito com material que contribui com elétrons, o cátodo que aceita elétrons, o eletrólito e um separador. Na descarga de uma bateria o ânodo fornece elétrons para oxidação gerando assim íons positivos. O mesmo ocorre com o cátodo que gera íons negativos, desencadeando o processo de recebimento de elétrons. Um elemento importante é o separador entre o ânodo e o cátodo, responsável por permitir o fluxo livre dos íons, o fluxo dos elétrons é forçado a trafegar pelo circuito externo, formando assim um circuito. Em uma bateria recarregável o processo é reversível. Na descarga o terminal positivo é o cátodo e o terminal negativo é o ânodo. Porém, durante a carga ocorre o inverso, ou seja, o terminal positivo é o ânodo e o terminal negativo o cátodo. A disposição dos elementos e a denominação assumida nos processos de carga e descarga de uma célula recarregável são exemplificados na Figura 17.

Figura 17 – Elementos de uma célula recarregável.



Fonte: Bezerra (2010).

Uma bateria recarregável pode ser literalmente obtida com a combinação de centenas de elementos e composta de vários tipos de eletrólitos, os quais podem produzir uma corrente elétrica (BEZERRA, 2010). Normalmente, a tensão nominal de uma célula situa-se entre 1,2 e 3,6 V. Dessa forma, é comum a utilização de várias células conectadas em série para formar uma combinação com tensão nominal mais elevada. A tensão nominal de uma bateria é assim definida pelo número de células conectadas em série multiplicada pela tensão nominal de uma única célula. As células são integradas e conectadas em série com somente um conjunto de terminais (PINHO et al., 2008). Entre os principais tipos de baterias, podem ser citadas quatro tecnologias mais utilizadas:

- Níquel Cádmio (NiCd);
- Níquel-Metal Hidreto (NiMH);
- Lítio-Ion (Li-Ion);
- Chumbo Ácido (Pb-ácido).

Uma bateria de NiCd é de tecnologia desenvolvida e madura. Porém a sua capacidade de armazenamento de energia não é muito elevada. É utilizada quando se quer vida longa, alta corrente de descarga e baixo custo. Suas principais aplicações são em telefones sem fio, câmeras de vídeo e ferramentas elétricas.

A bateria de NiMH tem uma alta capacidade de armazenamento de energia se comparada com as baterias NiCd. Porém seu ciclo de vida

é ligeiramente inferior ao das baterias NiCd. As aplicações principais dessas baterias são telefones celulares, câmeras digitais e notebooks.

A bateria Li-Ion é a tecnologia mais recente, e é utilizada quando se deseja alta densidade de energia e peso leve. Essas baterias possuem maior custo que as citadas anteriormente e precisam ser utilizadas dentro de padrões rígidos de segurança. Suas aplicações incluem notebooks e telefones celulares.

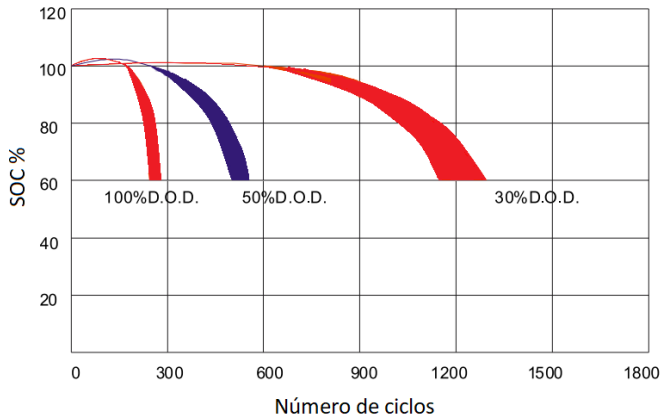
Uma bateria de Pb-ácido é a mais econômica quando o problema do peso pode ser desprezado. É muito usada em equipamentos hospitalares, cadeira de rodas elétricas, luzes de emergência e *no-breaks* (ELETRÔNICA, 2013). A questão econômica associada à disponibilidade do mercado faz com que as baterias recarregáveis de Pb-ácido sejam as mais utilizadas nos sistemas fotovoltaicos, eólicos, ou híbridos.

Os fabricantes de baterias geralmente definem a corrente de carga ou descarga e as tensões do final de carga ou descarga. Dessa forma, é importante verificar as condições de referência definidas pelos fabricantes quando se compara a capacidade de diferentes produtos. Um parâmetro importante é o regime de carga (ou descarga). Este por sua vez é definido como a relação entre a sua capacidade nominal e o valor da corrente usada para fazer uma carga (ou descarga). Como exemplo, se a descarga de uma bateria de 150 Ah é realizada com uma corrente de 10 A, se diz então que o regime de descarga utilizado é de 15 horas, o valor da capacidade da bateria é simbolizado como C_{15} e a corrente utilizada para a descarga como I_{15} .

O estado de carga de uma bateria, conhecido como SOC (do Inglês, *State of Charge*), informa a capacidade de descarga da bateria em um dado momento. Um estado de carga de 100% significa que a bateria está totalmente carregada. Muitas vezes, ao invés de se usar o SOC, a profundidade de descarga, PD, (do Inglês *Depth of Discharge* - DOD) é preferida pela literatura. A PD é definida como 0% quando a bateria está totalmente carregada e 100% quando está totalmente descarregada ($PD = 100\% - SOC$).

É comum associar a vida de uma bateria ao processo de ciclagem. Um ciclo refere-se a uma descarga seguida de uma recarga. Os ciclos fornecidos pelos manuais sempre consideram um SOC inicial de 100%, até certo valor de PD. A vida útil de uma bateria é representada pelo número de ciclos em função da PD. O Gráfico ilustrado na Figura 18 apresenta as características de vida útil de uma bateria Pb-ácido em uso cíclico.

Figura 18 – Gráfico das características de vida útil em uso cíclico.



Fonte: Adaptado de Informática (2016).

3.1.5.1 Operação e Carga de uma Bateria

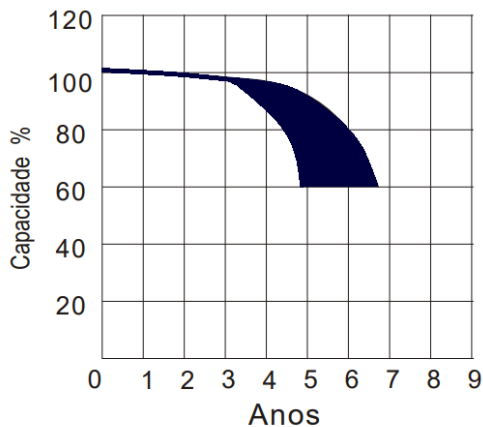
Descargas profundas frequentes reduzem significativamente a vida útil da bateria. Por outro lado, o carregamento pleno é necessário para aumentar o tempo de vida útil da mesma. Contudo, a depender das condições específicas de operação, em muitas situações o carregamento pleno e adequado, dependerá da estratégia utilizada para tal. Logo, métodos de operação e carga tem um importante impacto na vida útil da bateria (PINHO et al., 2008).

As aplicações cíclicas são as que apresentam o menor tempo de vida útil. Existem vários fatores que afetam a vida útil cíclica. Os principais são: taxa de descarga, temperatura ambiente, profundidade de descarga e a forma de carga. De acordo com Unicoba (2015) recomenda-se sempre selecionar uma bateria de maior capacidade porque quanto menor a profundidade da descarga maior é a sua vida útil. Com uma profundidade de descarga diária de 100%, a vida útil da bateria fica entre 200 a 250 ciclos (6 a 8 meses).

Uma estratégia adotada em algumas aplicações é a utilização de tensão de carga constante ou tensão de flutuação. Isso é feito através de uma fonte primária que deve ter potencial suficiente para manter cada célula da bateria com tensões entre 2,25 a 2,30 V, assim a bateria permanece sempre carregada e opera em caráter secundário, sendo requisitada apenas quando a fonte primária falhar por algum motivo.

Essa fonte primária fica ligada em paralelo com a bateria e com a carga a ser alimentada. Desta forma a bateria não fornece corrente, por estar ligada a uma fonte de maior capacidade, permanecendo em estado de flutuação. A operação em flutuação é o que mais preserva a vida útil de uma bateria e sua duração fica em torno de 5 a 7 anos (UNICOBÁ, 2015). O Gráfico ilustrado na Figura 19 apresenta as características de vida útil de uma bateria Pb-ácido em regime de flutuação.

Figura 19 – Gráfico das características de vida útil em flutuação.



Fonte: Adaptado de Unicoba (2015).

3.1.6 Sistemas de Condicionamento de Potência

Os sistemas de condicionamento de potência têm a finalidade de condicionar a energia para a alimentação de determinadas cargas, visando o melhor aproveitamento dos recursos de geração. Estes sistemas são compostos por controladores de carga, retificadores, inversores de frequência, reguladores de tensão, etc. Esses equipamentos serão descritos a seguir.

3.1.6.1 Controlador de Carga

É geralmente utilizado em arranjos fotovoltaicos, sua função é a de proteger as baterias de serem sobrecarregadas, ou descarregadas

profundamente, e assim garantir, que toda a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos seja armazenada com maior eficácia nas baterias de modo a evitar que estas operem em condições anormais que contribuem para a redução de sua vida útil.

Um controlador de carga possui dois ou três pontos de conexão, cada um contendo dois terminais, um para conexão positiva e outro para conexão negativa, isso varia de acordo como o modelo do controlador e o tipo de projeto a ser aplicado. A Figura 20 ilustra um modelo de controlador de carga comercial com a indicação de conexão da fonte fotovoltaica, da bateria e da carga a ser atendida.

Figura 20 – Exemplo de um controlador de carga comercial.



Fonte: Solar (2017).

3.1.6.2 Conversores AC/DC

Conversores AC/DC são dispositivos que fazem conversão de corrente alternada para corrente contínua. A maioria dos equipamentos eletrônicos necessitam ser alimentados com corrente contínua, dessa forma a energia fornecida por fontes como aerogeradores, grupos geradores ou até mesmo a energia da rede de distribuição que são fornecidas na forma de corrente alternada precisam ser convertidas em corrente contínua.

3.1.6.3 Inversores de Tensão DC/AC

Os inversores de tensão são utilizados para converter a energia de corrente contínua em corrente alternada, devendo atender aos padrões

da rede elétrica local.

O princípio de funcionamento de um inversor está baseado em mecanismos de chaveamento que alteram o fluxo de corrente entre os sentidos positivo e negativo. Dentre as características principais dos inversores estão as suas tensões de operação de entrada (DC) e saída (AC), frequência de saída, potência nominal, capacidade de surto, eficiência, e forma de onda de saída.

Os inversores podem ser utilizados em diversas aplicações de acordo com suas características. Alguns modelos funcionam a partir de uma bateria, outros atuam a partir de arranjos de painéis fotovoltaicos sendo esses chamados de inversores fotovoltaicos.

Os inversores fotovoltaicos podem ser classificados em *grid-tie* e *off-grid*. Os inversores *grid-tie* (conectado à rede) são utilizados para conectar e sincronizar um sistema fotovoltaico sem baterias na rede elétrica de distribuição pública, assim, quando falta energia da distribuidora, por questões de segurança, o sistema fotovoltaico se desliga automaticamente. Já os inversores *off-grid* (fora da rede) são utilizados em aplicações isoladas, desconectadas da rede de distribuição pública (PEREIRA; GONÇALVES, 2008). A Figura 21 ilustra em (a) e (b) exemplos de inversores fotovoltaicos comerciais *grid-tie* e *off-grid*, respectivamente.

Figura 21 – Inversores fotovoltaicos *grid-tie* e *off-grid*.



(a) Inversor *grid-tie*



(b) Inversor *off-grid*

Fonte: Solar (2017).

A utilização de inversores é fundamental em sistemas híbridos de energia para alimentar as cargas que operam com corrente alternada.

3.1.6.4 Conversores DC/DC

Estes conversores são equipamentos que tem a capacidade de elevar ou baixar a tensão DC. Podem ser classificados como abaixador de tensão (*buck* ou *step-down*), elevador de tensão (*boost* ou *step-up*) e abaixador - elevador (*buck-boost*). Este tipo de conversor é utilizado quando há necessidade de modificar o valor da tensão DC fornecida pelo sistema de geração/armazenamento para atender a tensão específica de determinada carga (PINHO et al., 2008).

Um conversor DC/DC possui uma conexão de entrada utilizada para conectar a fonte de tensão que deverá ser reduzida ou aumentada e uma conexão de saída para conexão da carga, que deverá apresentar o valor de tensão ajustado para a mesma. A Figura 22 ilustra um conversor DC/DC abaixador de tensão (*buck*) ajustável com base no circuito integrado LM2596. As setas indicam os terminais para ligação de entrada e saída, bem como o ponto para ajuste da tensão que é feito através de um potenciômetro trimpot.

Figura 22 – Conversor DC/DC abaixador de tensão (*buck*) ajustável.



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

3.2 SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIA

Os sistemas híbridos de energia são formados por dispositivos de conversão de energia que interatuam com a finalidade de gerar energia elétrica. Esses sistemas incluem pelo menos uma fonte de energia renovável em sua configuração, sendo as fontes fotovoltaicas e eólicas mais comuns, podendo ser usadas como alternativa aos sistemas convencionais (DEBASTIANI, 2013; MESQUITA et al., 2010).

O inconveniente comum com determinados tipos de fontes renováveis são as suas naturezas imprevisíveis. Sistemas fotovoltaicos ou

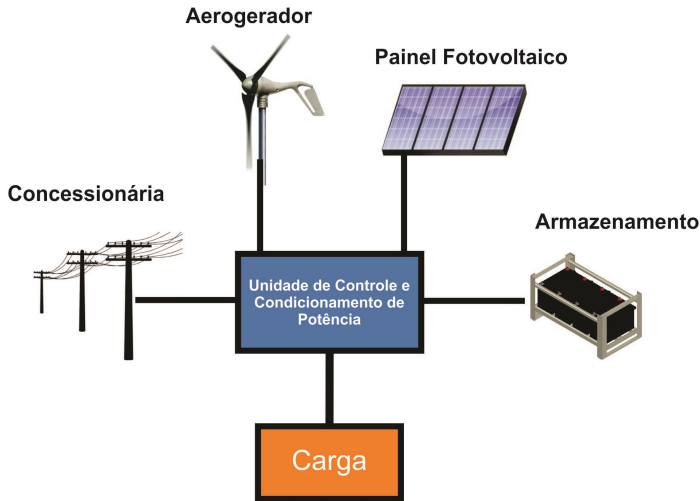
de energia eólica, não produzem energia utilizáveis em determinados períodos devido à dependência de horas de sol no primeiro caso e em velocidades de vento insuficiente para uma geração consistente no segundo caso (DESHMUKH; DESHMUKH, 2008). As possíveis soluções para este problema de viabilidade incluem o uso dessas fontes renováveis que podem ser combinadas com o uso de grupo geradores (PÉREZ-NAVARRO et al., 2016; COSTA, 2016).

Os sistemas híbridos de energia visam atender determinada carga local podendo ser isolado ou conectado à rede pública. Devido à natureza incerta dos recursos renováveis, a energia da rede e a carga acumulada em baterias podem ser utilizados como recursos de *backup*. Na realidade, durante os períodos em que a produção de recursos renováveis não é suficiente para atender a demanda, a parte restante da carga pode ser fornecida pelos recursos de *backup*. Por outro lado, quando os recursos renováveis têm geração extra, o excesso de energia pode ser absorvido pelos acumuladores de energia. Portanto, os sistemas híbridos têm mais confiabilidade do que apenas um sistema de energia renovável isolado devida a possibilidade de uma fonte suprir a falta temporária de outra, determinando a capacidade de operar com menor risco de interrupção energética (BAHRAMARA; MOGHAD-DAM; HAGHIFAM, 2016; PINHO et al., 2008). Normalmente os sistemas híbridos podem contar com a combinação dos seguintes elementos:

- Módulos fotovoltaicos;
- Aerogeradores;
- Energia fornecida pela concessionária de distribuição;
- Grupos geradores a diesel, a gasolina ou a gás;
- Baterias (formando um banco de baterias);
- Equipamentos de condicionamento de potência (inversores de tensão, retificadores e controladores de carga).

Os equipamentos de geração são conectados através de cabeamento adequado a uma unidade de controle composta por dispositivos de proteção, manobra (chaves, disjuntores, relés) e condicionamento de potência (conversores, inversores, retificadores), para o fornecimento de energia elétrica as cargas conectadas (PINHO et al., 2008). A Figura 23 apresenta a configuração geral de um sistema híbrido.

Figura 23 – Configuração geral de um sistema híbrido.



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Grande parte dos sistemas híbridos ficam instalados em locais remotos, de difícil acesso e, principalmente, com falta de mão-de-obra qualificada para operá-los. Esse fato justifica a importância da implementação de ferramentas automáticas que permitam o monitoramento e o controle da operação do sistema, assegurando assim a redução dos custos operacionais e a sua confiabilidade.

Segundo Pinho et al. (2008), o sistema de monitoramento e controle, seja ele local ou remoto, deve possuir as seguintes características:

- Possibilidade de medições de grandezas elétricas do sistema (tensão, corrente, e frequência de operação) e de outras grandezas, como por exemplo, temperatura dos módulos e/ou das baterias, velocidade e direção do vento, densidade do ar, irradiância, quantidade e consumo de óleo diesel, velocidade angular (rpm) da turbina eólica, entre outras;
- Regulação do ciclo de carga e descarga das baterias, a fim de evitar a redução de sua vida útil;
- Capacidade de armazenar as informações obtidas pelo monitoramento;

- Definição de um sistema de proteção (chaves, disjuntores, relés) e alertas (luminoso e/ou sonoro), de modo a prevenir e identificar condições de contingências;
- Monitoramento em tempo real das condições operacionais, bem como a previsão das mesmas através das informações coletadas;
- Capacidade de transmitir sinais de monitoramento e comando via protocolos de comunicação.

Usualmente, a operação dos sistemas híbridos é baseada a priori pela energia gerada através das fontes renováveis como solar e eólica. No entanto, caso ocorra uma sequência de dias nublados e/ou de vento fraco o sistema passa automaticamente a operar com a energia oriunda de outras fontes auxiliares, podendo estas serem originadas por um banco de baterias ou por um grupo gerador, a depender das estratégias de operação adotadas a fim de garantir o fornecimento de energia (PINHO et al., 2008).

3.2.1 Dimensionamento de Sistemas Híbridos

O dimensionamento do conjunto de geração do sistema híbrido envolve a quantificação das potências de cada uma das fontes e da demanda a ser atendida. Em locais onde há maior incidência de ventos pode ser vantajoso aproveitar mais a energia eólica do que a fotovoltaica. Já em regiões tropicais, com maior incidência solar durante o ano, a energia fotovoltaica é mais vantajosa. O dimensionamento, deve levar em conta uma série de fatores como a potencialidade local de cada fonte, a complementaridade entre as mesmas, a disponibilidade de materiais e equipamentos, as dificuldades logísticas de implantação, e os custos envolvidos (MATOS et al., 2010; COSTA, 2016).

3.2.1.1 Dimensionamento da Carga Diária

O cálculo da demanda a ser atendida é expressa em kWh com base na curva de carga de consumo diário das unidades consumidoras conforme a Equação 5.

$$CargaDia = \sum_{t=1}^{24} P = (t) \cdot \Delta t \quad (5)$$

Em que:

$P = (t)$: demanda de potência ativa medida em cada intervalo.

Δt : intervalo de medição.

3.2.1.2 Dimensionamento da Fonte Solar

A Equação 6 é utilizada para calcular a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos, $EPV(kWh)$.

$$EPV(d) = (1 - p)W_p \cdot HSP \quad (6)$$

Em que:

p : perda de 20% por dispersão e no cabeamento.

W_p : potência de pico (nominal) em W do painel.

HSP : horas de sol pleno, reflete o número de horas que a irradiação solar permanece constante e igual a $1000 W/m^2$.

3.2.1.3 Dimensionamento da Fonte Eólica

A potência do aerogerador obtém-se pela Equação 7.

$$Paero(t) = P1 + (V(t) - V1) \frac{P2 - P1}{V2 - V1} \quad (7)$$

Em que:

t : corresponde a cada uma das 24 horas do dia.

$V(t)$: velocidade do vento medida em m/s , no instante de tempo t .

$V1, P1$: velocidade em m/s e potência em kW no instante anterior a t .

$V2, P2$: velocidade em m/s e potência em kW no instante posterior a t .

A geração diária é expressa pela Equação 8.

$$PaeroDia(d) = \sum Paero(t) \quad (8)$$

3.2.1.4 Dimensionamento do Banco de Baterias

O dimensionamento do banco de baterias é baseado no tempo de autonomia em que os acumuladores oferecem ao sistema. As Equações 9 e 10 podem ser utilizadas para calcular o tempo de autonomia de um banco de baterias.

$$E_{bb} = N_b \cdot V_b \cdot C_b \quad (9)$$

$$T_a = E_{bb} \cdot P_d \cdot 1 / (100 \cdot P_{carga}) \quad (10)$$

Em que:

E_{bb} : Energia do banco de baterias (Wh).

V_b : Tensão da bateria (V).

C_b : Capacidade nominal da bateria (Ah).

N_b : Número de baterias do banco.

T_a : Tempo de autonomia (h).

P_d : Profundidade de descarga (%).

P_{carga} : Potência da carga (W).

3.3 UTILIZAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS E SISTEMAS HÍBRIDOS EM ABRIGOS DE CULTIVO

Uma das principais vantagens de um sistema híbrido de energia é a sua confiabilidade devido a complementaridade das fontes renováveis presentes nestes sistemas. A energia obtida pode ser utilizada para atender às necessidades energéticas de um abrigo de cultivo, tornando a prática mais sustentável (MAHMOUDI et al., 2008).

Nos países caracterizados por clima temperado com invernos rigorosos os ambientes protegidos precisam contar com aquecedores para que seja possível produzir, e o interesse em fontes de energia alternativas

ou renováveis é bastante elevado devido as grandes cargas energéticas necessárias para o aquecimento e o alto custo dos combustíveis fósseis (ESEN; YUKSEL, 2013). Já em lugares de climas tropicais e subtropicais, que é o caso do Brasil, é possível produzir durante o ano todo sem a necessidade de aquecedores, porém o calor natural em excesso pode danificar o cultivo (PURQUERIO; TIVELLI, 2006) trazendo a necessidade da utilização de equipamentos para resfriamento, o que faz desses ambientes grandes consumidores de energia.

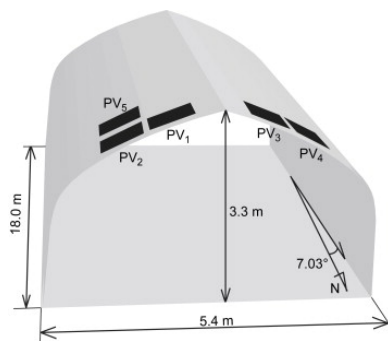
O aumento do uso de tecnologias de geração híbrida na agricultura trará mais sustentabilidade nas práticas agrícolas resultando em benefícios econômicos para os agricultores contribuindo com a preservação do meio ambiente (VOURDOUBAS, 2015a).

Na literatura existem trabalhos que abordam o uso de energias renováveis em cultivo protegido, sendo que alguns trabalhos baseiam-se em sistemas híbridos e outros em sistemas isolados com foco para novas tecnologias para a geração de energia, como os trabalhos de Cossu et al. (2016), Yano et al. (2009), Vourdoubas (2015b), que descrevem resultados de pesquisas no uso de módulos fotovoltaicos semi-transparentes integrados ao telhado dos abrigos de cultivo. A Figura 24 (a) ilustra um exemplo de módulo fotovoltaico semi-transparente e a Figura 24 (b) a forma de utilização destes módulos integrados ao telhado de um abrigo.

Figura 24 – Integração de módulos semi-transparentes ao telhado de um abrigo.



(a) Módulo semi-transparente



(b) Ilustração da integração

Fonte: Yano, Onoe e Nakata (2014).

Quanto aos sistemas híbridos aplicados em cultivo protegido destacam-se a utilização nas chamadas *seawater greenhouses* que são

casas de vegetação localizadas em regiões áridas que utilizam energia renovável para bombear a água do mar para a realização do cultivo (REILLY; CONDLIFFE, 2016). Um exemplo desta prática é a *Sundrop Farm* uma fazenda com capacidade de produção 15 mil toneladas de tomates em ambiente protegido situada em Port Augusta no sul da Austrália. A fazenda possui uma planta solar heliotérmica para geração de eletricidade. Este processo de geração é feito com o uso e acúmulo do calor proveniente dos raios solares que são concentrados com o auxílio de espelhos que refletem a incidência solar para um único ponto, denominado receptor. O calor concentrado no receptor aquece um fluido térmico. Esse fluido armazena o calor e aquece a água gerando vapor para movimentar uma turbina ligada em um gerador e assim produzir energia elétrica. A energia elétrica produzida é utilizada para aquecimento e refrigeração do ambiente e também para bombear a água do mar, que por sua vez passa por um processo de dessalinização para ser utilizada na irrigação dos tomateiros (KLEIN, 2016). A Figura 25 ilustra as instalações de uma unidade da *Sundrop Farm*.

Figura 25 – Unidade da Sundrop Farm em Port August - Austrália.



Fonte: Klein (2016)(2016).

Ao todo são 23 mil espelhos que refletem a luz solar em direção a torre receptora de 127 metros de altura com capacidade de produção de até 40 MW de energia, o suficiente para alimentar a planta de dessalinização e fornecer as necessidades de eletricidade da fazenda. Ao todo foram investidos 200 milhões de dólares na construção do projeto (KLEIN, 2016; BRICE, 2017).

4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE SUSTENTÁVEL PARA ABRIGOS DE CULTIVO

Este capítulo descreve o sistema de controle proposto apresentando sua arquitetura e detalhes da implementação física. Também são descritas as estratégias de controle, os materiais e dispositivos utilizados para construir os protótipos de sensores, linguagens de programação e ferramentas utilizadas para desenvolver os softwares de controle.

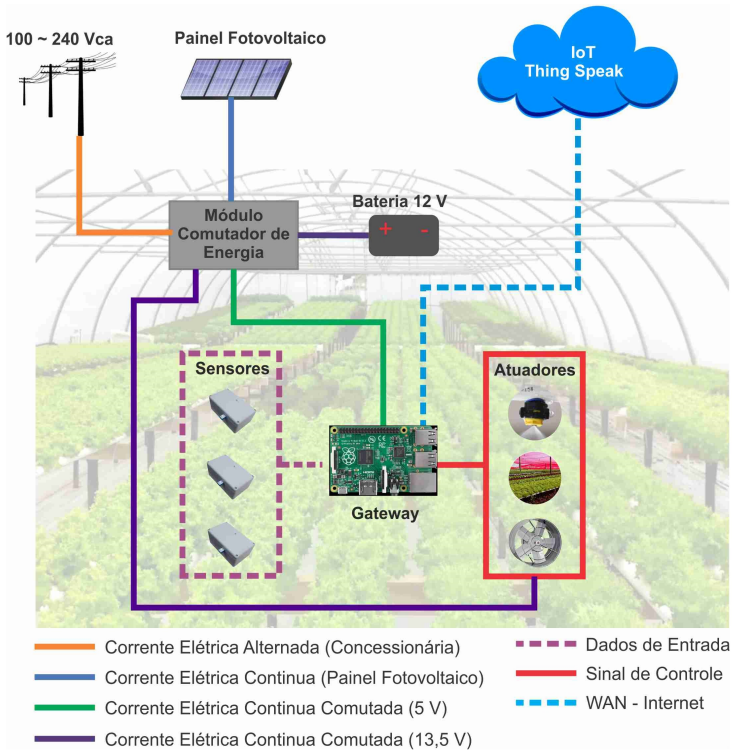
4.1 DESCRIÇÃO LÓGICA DA ARQUITETURA DESENVOLVIDA

O controle de um abrigo de cultivo é realizado através de um sistema que executa um monitoramento contínuo das variáveis do ambiente e, a partir destas, faz o controle para manter o microclima desejável às necessidades fisiológicas das plantas ali cultivadas.

Além de controlar o ambiente, o sistema precisa integrar o gerenciamento dos recursos energéticos utilizados na operação do abrigo e continuar operacional caso ocorra falhas de energia elétrica, principalmente interrupções por grandes períodos de tempo. Para introduzir esse gerenciamento dos recursos energéticos e alimentar todo o processo de operação do abrigo foi projetado um módulo comutador de energia (MCE).

A arquitetura lógica inclui o MCE, os sensores para obter as condições climáticas, um controlador central ou *gateway* para realizar o controle do sistema, e alguns atuadores que fazem a manipulação das variáveis controladas. A Figura 26 apresenta a visão geral da arquitetura proposta ilustrando todos os elementos que fazem parte do sistema.

Figura 26 – Visão geral da arquitetura do sistema.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O MCE alimenta o abrigo realizando a comutação entre três fontes de energia, conforme a disponibilidade dos recursos, prioritariamente na seguinte ordem: i) energia solar proveniente de um arranjo fotovoltaico, para aproveitar a energia do sol e tornar o sistema mais sustentável; ii) a da rede pública fornecida pela concessionária de energia elétrica; iii) de uma bateria estacionária de Pb-ácido para operar em caráter secundário, devendo ser exigida apenas quando as fontes (i) e (ii) falharem. Além de realizar o controle das fontes de energia o MCE deverá monitorar e realizar o envio de informações do seu próprio funcionamento com base nos valores de tensão medidas na saída de cada fonte de energia. A Figura 27 ilustra o fluxograma de funcionamento do MCE.

Figura 27 – Fluxograma de funcionamento do MCE.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os sensores enviam os dados climáticos do interior do abrigo para o *gateway* via comunicação sem fio que operam no espectro de frequência de 2,4 GHz ISM (*Industrial Scientific and Medical*). O *gateway* recebe os dados provenientes dos sensores e os armazena em

uma base de dados local e na nuvem. O *gateway* também tem a finalidade de fornecer uma aplicação web para a visualização das condições climáticas, acompanhar o estado atual dos atuadores, o consumo de energia, realizar configurações dos *setpoints* e fazer consultas do histórico de leituras em um intervalo de datas de forma local ou remotamente.

4.2 DESCRIÇÃO FÍSICA DA ARQUITETURA DESENVOLVIDA

Com base na arquitetura lógica foi desenvolvida a arquitetura física, ou seja, a construção de *hardware* e o desenvolvimento dos *softwares*. A seguir são descritas detalhadamente os módulos do sistema no que diz respeito ao hardware utilizado e o software desenvolvido.

4.2.1 Gateway

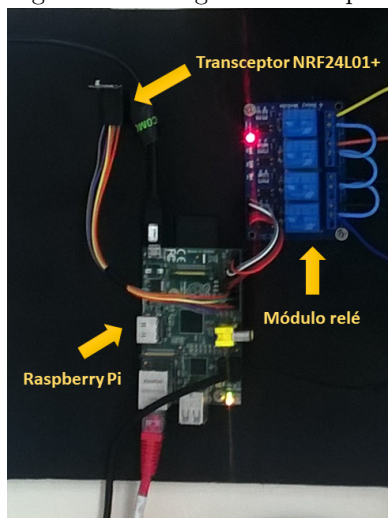
O *gateway* é o controlador central, fica responsável por realizar todo o manejo de um abrigo. Foi desenvolvido com base em uma placa do tipo *Raspberry Pi Model 1* que é um pequeno computador que utiliza um processador *Broadcom©BCM2835*, que permite a execução de um sistema operacional e possui uma interface GPIO (*General Purpose Input/Output*) de 26 pinos para interação com o ambiente externo. Possui também uma interface de rede *ethernet* (PI, 2016), para conexão com a internet. Nos pinos da interface GPIO foram acoplados um transceptor NRF24L01+ para recepção dos dados enviados por um ou mais sensores sem fio, um módulo contendo o CI (circuito integrado) L298N para acionamento de motores como o que estende e recolhe o sombrite e um módulo relé para o controle de atuadores. E em sua interface de rede foi conectado um cabo de rede para a conexão com a internet.

Foi instalado no *Raspberry Pi* o sistema operacional *Arch Linux* ARM, que é uma distribuição *Linux* desenvolvida para executar em processadores com arquitetura ARM (LEAD, 2017), esse sistema operacional executa uma aplicação escrita na linguagem *Python* com a utilização do *Framework Django* que é responsável por fornecer a aplicação web descrita anteriormente e realizar todo o controle do abrigo de cultivo que é feito com base no controle de ação liga-desliga (*on-off*).

O *gateway* também fica responsável por enviar os dados recebidos por meio dos sensores ao *ThingSpeak™*, uma plataforma gratuita de Internet de Coisas (*IoT*) que permite coletar e armazenar dados de

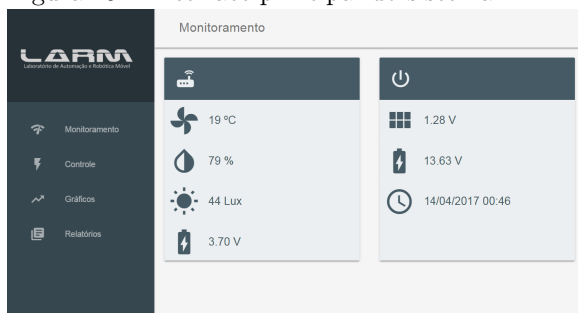
sensoriamento na nuvem e desenvolver aplicações *IoT* fornecendo recursos que permitem analisar e visualizar informações através da geração de gráficos e atuar sobre os mesmos (THINGSPEAK, 2017). As Figuras 28 e 29 ilustram respectivamente os componentes que formam *gateway* e a página principal da interface fornecida pelo sistema web.

Figura 28 – Imagem dos componentes que formam o (*gateway*).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 29 – Interface principal do sistema.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A interface do sistema web é composta basicamente por 4 submenus: o submenu Monitoramento serve para visualização das informações

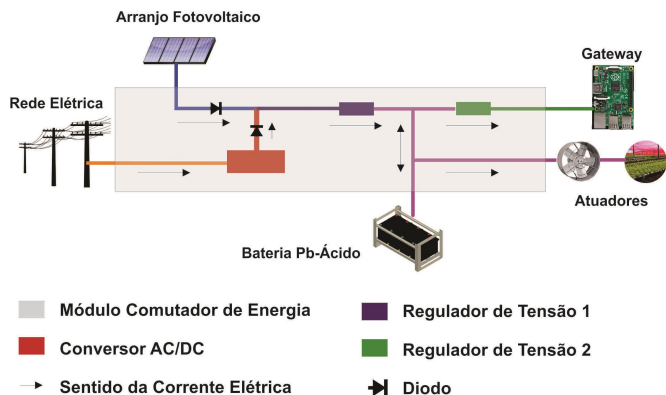
de temperatura, umidade, luminosidade do interior do abrigo e também do estado de operação do MCE por meio dos valores de tensão da fonte de energia fotovoltaica e da bateria; o submenu Controle, é utilizado para definir os *setpoints* de acionamento dos atuadores para o funcionamento automático do sistema ou também fazer o acionamento manual dos mesmo através de botões para ligar e deligar cada atuador individualmente; o submenu Gráfico, exibe gráficos lineares das condições climáticas; o submenu Relatórios apresenta históricos das informações de monitoramento a partir de um intervalo de datas.

O sistema web conta com um *design* responsivo, ou seja, adapta-se conforme o tamanho da tela do dispositivo que está acessando a aplicação para uma melhor usabilidade e visualização em dispositivos móveis como *smartphones* e *tablets* e é acessado por qualquer navegador de internet através de um URL formada pelo *hostname* ou endereço IP do *Raspberry Pi* e a porta de escuta do processo do *web server*.

4.2.2 MCE - Módulo Computador de Energia

A gestão dos recursos de energia para o abrigo compete ao MCE que é composto basicamente por três interfaces de entrada de energia, uma para cada fonte descrita anteriormente e duas interfaces de saída, uma para o *gateway* e outra para os atuadores. Internamente possui uma fonte AC/DC para converter a energia AC fornecida pela concessionária de energia elétrica em corrente DC e dois reguladores de tensão LM2596 DC/DC tipo *buck* ajustável para regular as tensões de saída para manter a bateria em flutuação e para alimentar o sistema de controle do abrigo. Esse regulador tem uma ótima eficiência e suporta uma corrente máxima de 3 A. A tensão de saída pode ser ajustada entre 1,5 a 35 VCC e a entrada pode variar de 3,2 a 40 VCC. O MCE também conta com dois diodos 1N5408 para garantir o sentido único da corrente elétrica.

Figura 30 – Arquitetura do MCE.

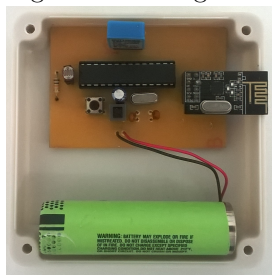


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.3 Sensor Sem Fio

Para a captura das condições climáticas do abrigo foi desenvolvido um sensor sem fio composto por um microcontrolador *ATmega328p*, que possui arquitetura de 8 bits com 32 KB de memória programável (ATMEL, 2016); um sensor LDR (*Light Dependent Resistor*), para fazer a aquisição da luminosidade; um sensor digital de temperatura e umidade DHT11 (*Digital Humidity and Temperature Sensor*), que permite medir temperaturas entre 0 a 50°C e níveis de 20 a 90% da umidade relativa do ar, sendo este de grande confiabilidade, porém, não realiza leituras com pontos flutuantes (D-ROBOTICS, 2010); e um rádio transceptor NRF24L01+. A Figura 31 ilustra o sensor sem fio desenvolvido.

Figura 31 – Imagem do sensor sem fio.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O sensor sem fio é alimentado por uma bateria de 3,7V e executa um software escrito na linguagem de programação C para a sua operação, faz a medição e o envio da temperatura, umidade e luminosidade do ambiente a cada três minutos para o *gateway* via comunicação sem fio através do transceptor NRF24L01+. Este intervalo entre cada envio dos dados para o *gateway* foi obtido por um estudo de Abreu e Perez (2017) que visa reduzir o consumo de energia de um sensor sem fio sem prejudicar o processo de monitoramento. O microcontrolador fica em estado de dormência (*sleep*), e permanece no modo *power-down* durante três minutos para economizar energia, retoma a sua operação apenas ao término de cada ciclo para realização da transmissão dos dados monitorados. O intervalo de três minutos foi estabelecido com base nos padrões das mudanças de temperatura e umidade em abrigos de cultivo. Com a utilização deste método de operação a duração da bateria do sensor sem fio pode ser até seis vezes maior, já que o mesmo fica maior parte do tempo inativo.

5 AVALIAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO

Este capítulo descreve a metodologia empregada e os experimentos realizados na avaliação do sistema proposto.

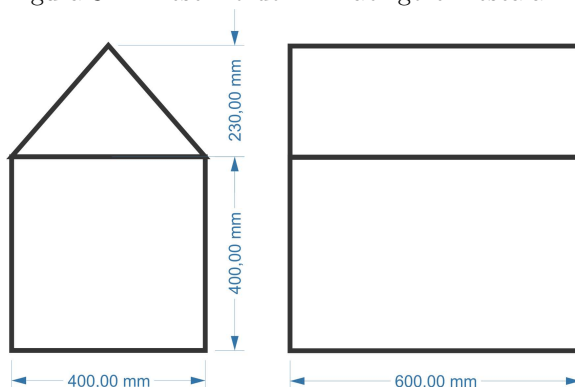
5.1 METODOLOGIA EMPREGADA NA AVALIAÇÃO DO SISTEMA

Antes da avaliação do sistema, fez-se necessário preparar um ambiente de testes no Laboratório de Automação e Robótica Móvel da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá. Esta preparação envolveu a utilização de um mini abrigo de cultivo onde foram instalados os equipamentos apresentados no Capítulo 4 para simular um abrigo real, como também realizar o dimensionamento e instalação das fontes de energia, do arranjo fotovoltaico e do MCE.

5.1.1 Mini Abrigo

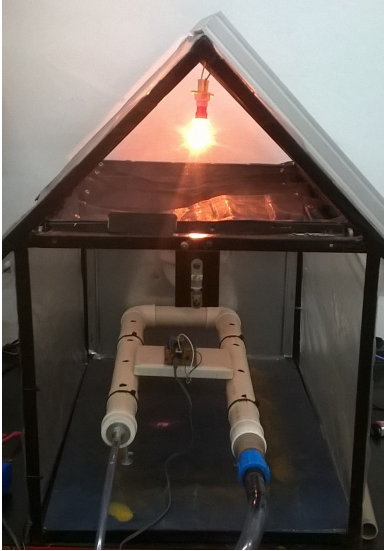
O mini abrigo projetado para simular um ambiente real é composto por um ventilador e um sombrite (ambos utilizam motores DC), nele foram instalados o *gateway*, o MCE e um sensor sem fio. As Figuras 32 e 33 apresentam, respectivamente, as medidas utilizadas e o mini abrigo construído.

Figura 32 – Desenho do mini abrigo em escala 1:8.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 33 – Imagem do mini abrigo construído.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.2 Dimensionamento da fonte solar e Instalação do MCE

O dimensionamento da fonte solar fotovoltaica foi feita com base nos valores do consumo diário em Wh do mini abrigo, envolvendo o *gateway* e os atuadores. O consumo é calculado com base na soma da potência nominal de cada equipamento utilizado no mini abrigo. Este valor foi obtido com a ligação de cada dispositivo individualmente em uma fonte de bancada que fornece através de um *display* o valor da corrente drenada pelo mesmo. Logo com o produto da tensão pela corrente obteve-se a potência em W. A Tabela 2 apresenta os valores da potência nominal dos equipamentos presentes no mini abrigo.

Considerando que todos os equipamentos irão operar 24h por dia, o consumo total diário é de 173 Wh. Porém, como o sistema deverá operar com outra fonte quando o recurso solar não estiver disponível, será considerado apenas o consumo durante o período de insolação cuja a média anual diária no local de instalação segundo o mapa solarimétrico de ANEEL (2008) é de 5 horas, o que equivale a 36 Wh por dia neste período.

Com base na potência necessária, foi verificado que apenas um painel de fotovoltaico com a especificações descritas na Tabela 3 é suficiente para atender a demanda operacional, já considerando uma perda de 20 % por dispersão no cabeamento.

Tabela 2 – Soma da potência dos equipamentos.

Equipamento	Potência Nominal
<i>Gateway</i>	1,5 W
Ventilador	2,1 W
Motor do Sombrite	3,6 W
Potência Total	7,2 W

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3 – Características do painel fotovoltaico utilizado.

Característica	Valor
Dimensões	340 x 540 x 25 mm
Potência Máxima (P_{max})	20 W
Tensão em Circuito Aberto (V_{oc})	21,4 V
Corrente em Curto Circuito (I_{sc})	1,27 A
Tensão de Máxima Potência (V_{mp})	17,2 V
Corrente em Potência Máxima (I_{mp})	1,17 A
Potência Pico nominal (W_p)	16 W
Energia gerada (EPV)	80 Wh/d

Fonte: Elaborada pelo autor.

O próximo passo foi a instalação e orientação do painel fotovoltaico. O suporte de fixação do painel solar foi feito com barras metálicas e possui regulagem do ângulo de elevação. A orientação foi feita com base em um sistema de posicionamento fixo. Os valores dos ângulos de elevação e azimute foram obtidos com a entrada das coordenadas geográficas de latitude e longitude do local de instalação através de uma calculadora de posicionamento solar *on-line* disponibilizada pelo *Earth System Research Laboratory*. A Figura 34 apresenta os valores obtidos.

Figura 34 – Interface da calculadora *on-line* utilizada para obter o valores da elevação e do azimute.

Location: Latitude: -28.95, Longitude: -49.468, Time Zone: -3, DST?

Date: Day: 24, Month: Jul, Year: 2017

Local Time: 12 : 24 : 24 PM Use Current Time

Result:

Equation of Time (minutes): -6.53	Solar Declination (°): 19.73	Apparent Sunrise (hh:mm): 07:06 <input checked="" type="checkbox"/> Show Sunrise	Solar Noon (hh:mm:ss): 12:24:24	Apparent Sunset (hh:mm:ss): 17:43 <input checked="" type="checkbox"/> Show Sunset	Az/El (m°) at Local Time: 0 / 41.34 <input checked="" type="checkbox"/> Show Azimuth
-----------------------------------	------------------------------	--	---------------------------------	---	--

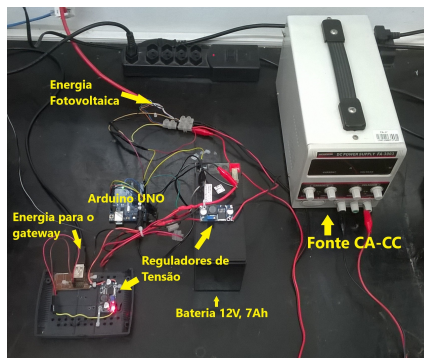
Fonte: Adaptado de Cornwall, Horiuchi e Lehman (2017).

Os valores obtidos foram de 0° para o azimute que corresponde exatamente ao norte e de $41,34^\circ$ para a elevação. A orientação do painel foi feita com o auxílio de um uma ferramenta de medida de ângulos e uma bússola por um aplicativo de *smartphone*. Após a fixação, foi colocado um cabo de força, para fazer a ligação entre os terminais de saída do painel fotovoltaico e a interface de entrada fotovoltaica do MCE. Também foi conectado o cabo de força para alimentação da concessionária (220 VAC) e uma bateria de 12 V, 7 Ah nas respectivas interfaces de entrada do MCE. A Figura 35 ilustra o painel fotovoltaico em (a) e o MCE após a sua instalação em (b).

Figura 35 – Estrutura instalada.



(a) Painel fotovoltaico.



(b) MCE desenvolvido.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Antes de conectar o MCE ao abrigo, foi necessário fazer o ajuste das tensões da fonte AC/DC e dos reguladores de tensão LM2596, com o auxílio de um multímetro. A saída da fonte AC/DC foi ajustada em 15 V. O primeiro regulador utilizado para regular as tensões vindas do painel fotovoltaico e da fonte AC/DC ajusta as tensões destinadas para manter a flutuação da bateria e para alimentar os atuadores foi regulado para permitir uma saída máxima de 14 V. O segundo regulador ajusta a tensão vinda das três fontes para alimentar o *gateway* foi regulado para permitir uma saída máxima de 5V, que é a tensão de operação do *Raspberry Pi* e demais periféricos conectados ao mesmo.

Após a instalação e configuração dos parâmetros necessários o MCE foi conectado ao mini abrigo em suas respectivas interfaces de saída de energia.

5.2 TESTES REALIZADOS NO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO

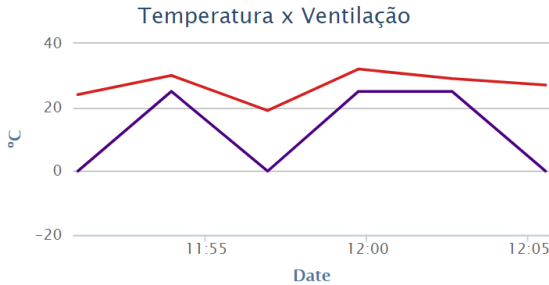
Para realizar a avaliação do sistema de automação e dos sensores, foram realizados alguns testes utilizando meios para causar distúrbios nas condições climáticas no mini abrigo. Isto foi feito com o auxílio de um soprador térmico direcionado para o interior do abrigo com o objetivo de elevar a temperatura e reduzir a umidade. As modificações das leituras de luminosidade foram feitas com o auxílio de uma lâmpada no próprio abrigo e também com o sistema de iluminação do laboratório alterando os estados entre aceso e apagado. Durante a execução dos distúrbios foi analisado o comportamento do sistema e os registros que o próprio sistema de controle armazenou. A Tabela 4 apresenta algumas amostras de registros obtidos no período de testes e a Figura 36 apresenta um gráfico do registro de atuação da ventilação em relação à temperatura do ambiente.

Tabela 4 – Tabela de amostras de testes realizados no mini abrigo de cultivo.

T (C°)	U (%)	L (Lux)	Sombrite	Ventilador
24	56	146	A	OFF
30	55	146	A	ON
19	63	109	A	OFF
32	41	553	F	ON
29	43	2961	F	ON
27	43	4216	F	OFF

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 36 – Amostra de variação da temperatura e o acionamento da ventilação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A linha vermelha no gráfico da Figura 36 representa o valor da temperatura e a linha azul, quando em 0 no eixo Y, indica que o ventilador está desligado e quando maior que 0 indica que o mesmo foi ligado quando o ambiente atingiu a temperatura configurada para o acionamento, neste caso, um *setpoint* de 25°C. O mesmo ocorre para o desligamento, que ocorre em 24°C, valor que foi definido como limite inferior da histerese.

5.3 EXPERIMENTOS REALIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DO MCE

A seguir serão descritos os experimentos realizados para avaliar o MCE.

5.3.1 Experimento 1 - Análise do Desempenho do MCE

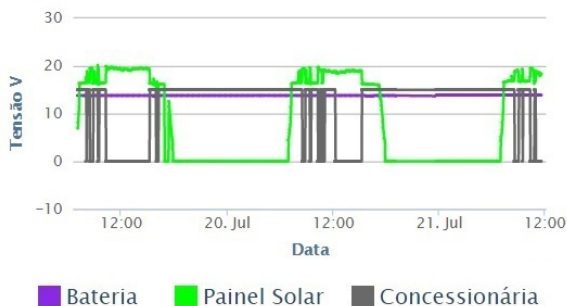
Foi instalado junto ao MCE um dispositivo para monitorar o seu próprio funcionamento, através da aquisição da corrente e tensões presentes no mesmo. Esse dispositivo é formado por um sensor ACS712, dois sensores de tensão, um Arduino Uno e um transceptor NRF24L01+. O sensor ACS712 serve para fazer a aquisição da corrente gerada pelo painel fotovoltaico, um dos sensores de tensão foi utilizado para gerar o sinal da tensão no painel e o outro para gerar o sinal da tensão da bateria.

Esses sensores foram conectados no Arduino Uno, que realiza o processamento do sinal analógico gerado pelos sensores e envia a informação já convertida nos valores de corrente e tensão para o *ga-*

teway através do transceptor NRF24L01+ via conexão sem-fio que opera no espectro de frequência de 2,4 GHz ISM. O *gateway* recebe as informações e faz o armazenamento dos parâmetros monitorados em sua base de dados local e após, realiza o envio desses dados para um canal da plataforma *ThingSpeak™* que fica responsável pela geração de gráficos para a visualização das informações monitoradas.

Foi gerado um gráfico pela plataforma *ThingSpeak* de uma amostra de tensões entre os dias 19/07/2017 e 21/07/2017 da saída do painel fotovoltaico, energia da concessionária fornecida pela saída da fonte AC/DC e tensão nos terminais da bateria. A Figura 37 representa o gráfico gerado.

Figura 37 – Tensões nas saídas das fontes utilizadas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

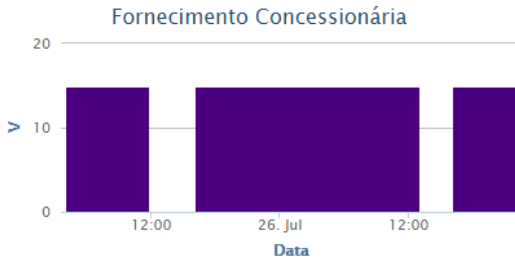
O gráfico em linhas confirma, a partir dos registros acumulados, que MCE funcionou conforme o esperado, comutando entre as fontes disponíveis, operando pela fonte fotovoltaica nos períodos com insolação suficiente. Quando a geração fotovoltaica já não atendeu mais a demanda necessária o MCE comutou para a concessionária de energia elétrica e manteve a tensão da bateria em carga de flutuação durante toda a operação.

Devido a existência de um prédio ao lado oeste do painel fotovoltaico, e a impossibilidade por motivos físicos de realizar a instalação em um local mais apropriado não houve um bom aproveitamento da incidência solar a partir das 16 horas devido a formação da sombra do prédio que incidia sobre o painel fotovoltaico.

As Figuras 38, 39 e 40 apresentam, respectivamente, os gráficos das tensões registradas pelas fontes monitoradas entre os dias 25/07/2017

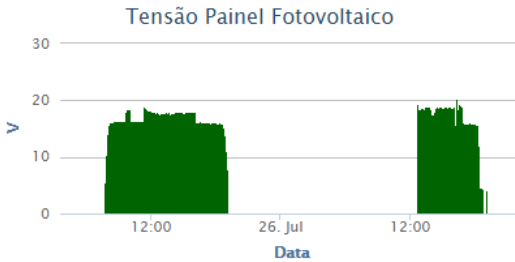
e 26/07/2017.

Figura 38 – Alimentação através da concessionária.



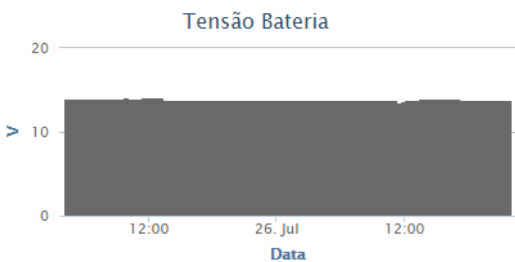
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 39 – Valores de tensão do painel fotovoltaico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 40 – Valores de tensão da bateria.

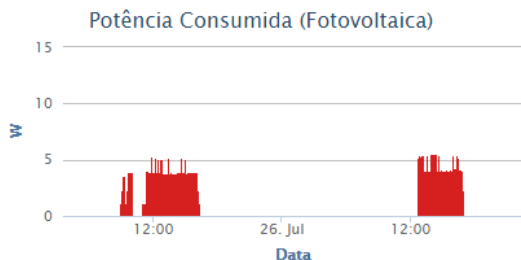


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 41 apresenta o gráfico da potência gerada pelo painel fotovoltaico e consumida pelo mini abrigo nos dias 25/07/2017 e

26/07/2017.

Figura 41 – Potência gerada pelo painel fotovoltaico e consumida pelo mini abrigo.

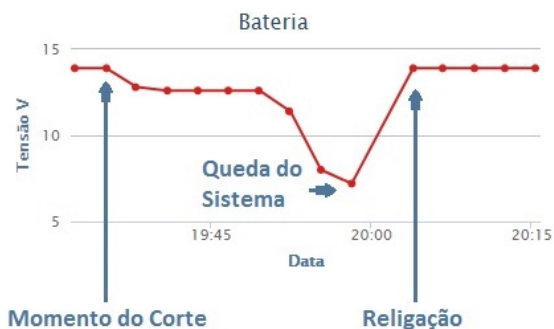


Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3.2 Experimento 2 - Teste de Operação com a Bateria

Neste experimento foi simulado a falta de energia da concessionária durante o período noturno visando verificar o tempo em que o sistema mantém-se operando apenas com a carga da bateria. O MCE foi desligado da rede da concessionária e ficou em observação até o término da carga da bateria. Após 10 minutos da queda total do sistema a energia da concessionária foi religada novamente, para verificar se o sistema retomaria a sua operação. O gráfico representado na Figura 42 apresenta o resultado observado.

Figura 42 – Tempo de autonomia da bateria.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O tempo de autonomia, até o sistema parar de operar por falta de carga na bateria foi de aproximadamente 30 minutos, retomando a sua operação em seguida, após a religação do fornecimento de energia pela concessionária.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de alimentos em ambiente protegido com a utilização de abrigos de cultivo automatizado vem crescendo exponencialmente ao redor do mundo. As vantagens são diversas como: a proteção das adversidades climáticas, a redução da incidência de pragas refletindo na economia de insumos e na melhor qualidade e aparência dos produtos, menor período entressafra, melhor disposição das plantas para aproveitamento do espaço físico, entre outros. As desvantagens ficam por conta da complexidade do manejo e da forte dependência de energia elétrica. Garantir o fornecimento de energia elétrica suprimindo a demanda necessária para a operação desses sistemas é fundamental, uma falta durante períodos prolongados poderá comprometer toda a produção, causando prejuízos inesperados.

A principal motivação para a realização desta dissertação foi integrar o controle de um abrigo de cultivo com um sistema híbrido de energia realizando a complementaridade das fontes presentes. O MCE (módulo comutador de energia) proposto desempenhou essa função fazendo a comutação entre a fonte renovável e a tradicional quando o recurso solar não está presente e ainda contou com uma bateria, para operar em situações emergenciais garantindo a operação do abrigo.

O desempenho da bateria foi de apenas 30 minutos, um tempo considerado baixo já que o esperado para uma bateria na configuração apresentada seria de 17 horas. A bateria utilizada não era nova, já tinha um certo tempo de vida útil, o ideal seria repetir o experimento descrito na Subseção 5.3.2 com uma bateria nova, ou com uma associação, formando um banco de baterias para garantir no mínimo 24 horas de autonomia com a falta das demais fontes.

A arquitetura apresentada pode ser utilizada em qualquer aplicação que utilize corrente contínua bastando apenas ajustes dimensionais relacionados à potência a ser suprida. Para a utilização deste MCE proposto em um abrigo de cultivo real se faz necessário incluir inversores de tensão e frequência na arquitetura apresentada, pois normalmente os atuadores presentes nos abrigos operam com corrente alternada.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Seguem algumas propostas para trabalhos futuros que visam aperfeiçoar e/ou estender o presente trabalho:

1. Elaborar um controlador para a recarga mais eficiente da bateria.
2. Implementar alertas para reportar eventos críticos no sistema como o envio de *SMS* para o agricultor informando faltas no fornecimento de energia.
3. Incluir inversores de tensão para alimentar cargas que operam com corrente alternada.
4. Incluir outras fontes renováveis como a energia eólica.
5. Avaliar o desempenho do sistema em um abrigo de cultivo real.

REFERÊNCIAS

ABREU, C. S. P. de; BASTOS, T. J. Automação de abrigos de cultivo para culturas hidropônicas. 2015.

ABREU, C. S. P. de; PEREZ, A. L. F. Redução do consumo energético de um sensor sem fio utilizado na automação de um abrigo de cultivo. **Anais do Computer on the Beach**, p. 220–229, 2017.

ABREU, T. M. d. **Proposta de Metodologia para definição de quantidade de grupos geradores de pequenas centrais hidrelétricas**. Dissertação (Mestrado), 2015.

AGRÍCOLAS, P. T. E. 2017. Disponível em: <<http://www.planttec.com.br/fotos-de-estufas-agricolas.asp>>. Acesso em: 14 de mar. de 2017.

AGUIAR, A. R. d. S. M. et al. Utilização de dados operacionais para a compreensão do desempenho de aerogeradores. 2012.

ALVES, A. F. **Desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático para painéis fotovoltaicos**. Tese (Doutorado), 2008.

ANEEL, A. Atlas de energia elétrica do brasil. **Brasília**, 2008.

ANTÔNIO, A. da S.; RIBEIRO, G. A. G.; PEREIRA, H. A. Utilização de seguidores solares aplicados a painéis solares: Construção e análise. Paraná: SBSE, 2014.

ARAÚJO, O. C. B. d.; BAYER, F. M. Controle automático de processos. 2016.

ASSOCIATION, N.-N. G. M. et al. **Environmental**. 2010.

ATMEL. Atmel 8-bit microcontroller with 4/8/16/32kbytes in-system programmable flash datasheet. 2016.

BAHRAMARA, S.; MOGHADDAM, M. P.; HAGHIFAM, M. Optimal planning of hybrid renewable energy systems using homer: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 62, p. 609–620, 2016.

BERLITZ, F. Sistemas de produção de hortaliças folhosas em ambiente protegido. 2017.

BEZERRA, L. Conversor cc-ca para aplicação em sistemas autônomos de energia elétrica. **Master's degree dissertation, Dept. Elect. Eng., Federal Univ. Ceara**, 2010.

BINACIONAL, I. **Unidades Geradoras**. 2017. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/unidades-geradoras>>. Acesso em: 22 de ago. de 2017.

BNDES, B. N. de Desenvolvimento Econômico e S. **Pronaf Eco**. 2018. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site-/home/financiamento/produto/pronaf-eco>>. Acesso em: 02 de mar. de 2018.

BRICE, E. **These farms use sun and seawater to grow crops in the arid Australian desert**. 2017. Disponível em: <<http://www.wired.co.uk/article/sundrop-farms-australian-desert>>. Acesso em: 30 de ago. de 2017.

CANSADO, J. C. A. **AGRILOGIC sistema para experimentação de controle climático de casas de vegetação**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2003.

CHOICE, S. **Solar trackers**. 2010. Disponível em: <<https://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/>>. Acesso em: 29 de ago. de 2017.

CORNWALL, C.; HORIUCHI, A.; LEHMAN, C. **Noaa esrl solar position calculator**. 2017. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>>. Acesso em: 24 de jul. de 2017.

COSSU, M. et al. Advances on the semi-transparent modules based on micro solar cells: First integration in a greenhouse system. **Applied Energy**, Elsevier, v. 162, p. 1042–1051, 2016.

COSTA, D. A. d. **Projeto de um sistema híbrido de geração de energia elétrica conectado à rede, incluindo o regulador eletromagnético de frequência-REF**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.

CRESESB. 2017. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em: 25 de ago. de 2017.

D-ROBOTICS. **DHT11 Humidity & Temperature Sensor**. Julho 2010. Disponível em: <<http://www.micropik.com/PDF/dht11.pdf>>. Acesso em: 15 de fev. de 2016.

DEBASTIANI, G. Avaliação da eficiência energética de um sistema híbrido eólico fotovoltaico para cascavél-paraná. 2013.

DESHMUKH, M.; DESHMUKH, S. Modeling of hybrid renewable energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 12, n. 1, p. 235–249, 2008.

ELETROBRAS. **Banco de Imagens**. 2017. Disponível em: <<http://eletrobras.com/pt/Paginas/Banco-de-Imagens.aspx>>. Acesso em: 31 de ago. de 2017.

ELETRÔNICA, S. **Manual das Baterias Recarregáveis, Pilhas e Carregadores**. 2013.

ENERGÉTICA, E.-E. de P. Plano nacional de energia 2030. **Rio de Janeiro: EPE**, p. 1970–2010, 2007.

ENERGIA, M. 2017. Disponível em: <<http://megaenergialtda.com.br/servico/manutencao-de-grupo-de-geradores-a-diesel/>>. Acesso em: 25 de ago. de 2017.

ESEN, M.; YUKSEL, T. Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse. **Energy and Buildings**, Elsevier, v. 65, p. 340–351, 2013.

FADIGAS, E. Energia solar fotovoltaica: Fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica. **Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo**, 2012.

FREITAS, C. M. **Controle PID em sistemas embarcados**. 2014. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/controle-pid-em-sistemas-embarcados/>>. Acesso em: 28 de nov. de 2017.

GAIO, J. O.; TOFOLI, F. L.; JR, D. d. S. O. Estudo de um modelo simples e prático aplicado à simulação de sistemas eletrônicos de conversão de energia solar fotovoltaica. **CEP**, v. 36307, p. 352, 2010.

GREENPOWER, V. **The Benefits of Solar Trackers**. 2015. Disponível em: <<http://www.valldoreix-gp.com/the-benefits-of-solar-trackers/>>. Acesso em: 29 de ago. de 2017.

GUERRA, W. de A. **Implementação de Controle Proporcional, Integral e Derivativo Digital em Controladores Lógico Programáveis**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2009.

HASSANIEN, R. H. E.; LI, M.; LIN, W. D. Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 54, p. 989–1001, 2016.

HORTALIÇAS, E. Cooperação prevê avanços tecnológicos no cultivo protegido de hortaliças. 2015. ISSN 2359-3172.

IERSEL STEPHANIE BURNETT, J. L.-C. Marc van; THOMAS, P. **Improving Irrigation with Sensors**. 2017. Disponível em: <<http://www.greenhousemag.com/article/gm0911-moisture-sensors-water-plant-quality/>>. Acesso em: 15 de set. de 2017.

INFORMÁTICA, A. S. de Energia e. **Manual Técnico Bateria de Chumbo Ácido Regulada por Válvula - Selada VRLA**. 2016.

JUNIOR, A. B. Manejo de ambientes protegidos: Estufas e casas de vegetação. **Casa da Agricultura**, 2011.

JUNIOR, R. T. M. **Avaliação de um sistema de controle autônomo para o monitoramento de abrigos de cultivo**. Dissertação (Mestrado), 2016.

KLEIN, A. First farm to grow veg in a desert using only sun and seawater. **New Scientist**, v. 6, 2016.

LEAD, A. L. P. **About Arch Linux**. 2017. Disponível em: <<https://archlinuxarm.org/about>>. Acesso em: 13 de fev. de 2016.

LITJENS, O. J. et al. Automação de estufas agrícolas utilizando sensoriamento remoto e o protocolo zigbee. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2009.

MAHMOUDI, H. et al. Weather data and analysis of hybrid photovoltaic–wind power generation systems adapted to a seawater greenhouse desalination unit designed for arid coastal countries. **Desalination**, Elsevier, v. 222, n. 1-3, p. 119–127, 2008.

MARTINS, F.; GUARNIERI, R.; PEREIRA, E. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 30, n. 1, p. 1304, 2008.

MATIAS, J. Teoria de controle pid. **Mecatrônica Atual**, v. 1, n. 3, p. 17–25, 2002.

MATOS, J. G. d. et al. Controle e operação de um sistema híbrido de geração de energia elétrica a. CBA, 2010.

MESQUITA, F. G. G. et al. **Design optimization of stand-alone hybrid energy systems**. Dissertação (Mestrado), 2010.

MOREIRA, H. M. Desempenho de métodos de manejo de irrigação para a cultura do tomateiro cultivado em campo e em casa de vegetação. Universidade Federal de Viçosa, 2002.

NEGOCIOS, R. C. . **Automação na produção hidroponica**. Dezembro 2013. Disponível em:
<<http://www.revistacampoenegocios.com.br/automacao-na-producao-hidroponica/>>.

NETO, J. G. V. et al. **Influência da forma de estufas agrícolas na performance estrutural e no conforto térmico**. Dissertação (Mestrado), 2015.

OLIVEIRA, A. L. d. L. Instrumentação–fundamentos de controle de processo–. **Vitória–ES. SENAI-ES**, 1999.

OLIVEIRA, F. Aguiar de; MOREIRA, M. C. AplicaÇÃo de um sistema neuro-fuzzy na sintonia de um controlador pid de um sistema de posicionamento dinâmico de uma embarcaÇÃo. 05 2016.

OLIVEIRA, M. R. V. de. O emprego de casas de vegetação no brasil: vantagens e desvantagens. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, n. 8, p. 1049–1060, 1995.

PASSOS, F. **SEGUIDOR SOLAR - TRACKER VANTAGENS E DESVANTAGENS PARTE 1**. 2017. Disponível em:
<<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/seguidor-solar-tracker-vantagens-e-desvantagens-parte-1.html>>. Acesso em: 29 de ago. de 2017.

PEREIRA, O. L.; GONÇALVES, F. F. Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: Estudo de caso do sistema de tubarão-sc. **Revista Brasileira de Energia**, v. 14, n. 1, p. 25–45, 2008.

PÉREZ-NAVARRO, A. et al. Experimental verification of hybrid renewable systems as feasible energy sources. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 86, p. 384–391, 2016.

PERILLO, P. S. C. Avaliação de software de modelagem de aproveitamento de energia solar para geração de energia elétrica nas condições climáticas do df. 2013.

PI, R. **RASPBERRY PI 1 MODEL A+**. Maio 2016. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware-/raspberrypi/>>. Acesso em: 15 de fev. de 2016.

PINHO, J. T. et al. Sistemas híbridos–soluções energéticas para a amazônia. **MME, Brasília**, 2008.

PINI. **Energia: Usina Eólica de Alegria I**. 2017. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/6-/artigo227165-2.aspx>>. Acesso em: 23 de ago. de 2017.

PURQUERIO, L. F. V.; TIVELLI, S. Manejo do ambiente em cultivo protegido. **Instituto Agrônomo de Campinas IAC, Centro de Horticultura. Campinas, SP**, 2006.

REILLY, M.; CONDLIFFE, J. **A Desert Full of Tomatoes, Thanks to Solar Power and Seawater**. 2016. Disponível em: <<https://www.technologyreview.com/s/602574/a-desert-full-of-tomatoes-thanks-to-solar-power-and-seawater/>>.

REIS, N. V. D. et al. Construção de estufas para produção de hortaliças nas regiões norte, nordeste e centro-oeste. **Embrapa Hortaliças-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2005., 2005.

RIBEIRO, H. E. B. et al. Implementação de um sistema de calculo para sistemas de energia solar. 2006.

RODRIGUES, M. V. S.; REIS, L. L. N. dos; BARRETO, L. H. S. C. Análise da eficiência na produção de energia eólica nos principais estados brasileiros produtores, por meio da aplicação de análise por envoltória de dados. **Revista Tecnologia**, v. 36, n. 1/2, p. 18–33, 2016.

ROECK, A. G. W.; SILVA, L. W. d. et al. Smart gardens-automação e monitoramento inteligente da agricultura. Florianópolis, SC, 2016.

SANTOS, L. L.; JÚNIOR, S. S.; NUNES, M. Luminosidade, temperatura do ar e do solo em ambientes de cultivo protegido. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, v. 8, n. 1, p. 83–93, 2010.

SEGUEL, J. I. L. Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica mppt e controle digital.

Master Degree Dissertation-Research Focus: Power Electronics, PPGEE-UFMG, 2009.

SILVA, A. J.; MUNHOZ, F. C.; CORREIA, P. B. Qualidade na utilização de energia elétrica no setor rural: problemas, legislação e alternativas. **Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural**, SciELO Brasil, 2002.

SILVA, B.; SILVA, A. d.; PAGIUCA, L. Cultivo protegido: Em busca de mais eficiência produtiva. **Revista Técnica Hortifrutí Brasil**, p. 10–18, 2014.

SILVA, J. M.; BAZANELLA, A. S. Ajuste de controladores pid. **Apostila da Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, v. 2, 2000. Disponível em: <<http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid-/Apostila/apostila/node20.html>>.

SILVA, R. Energias renováveis. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 1, n. 1, p. 35–42, 2007.

SOLAR, G. d. T. de E. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. **CEPEL CRESCER, Rio de Janeiro**, 2014.

SOLAR, M. C. **Inversores**. 2017. Disponível em: <<https://www.minhacasasolar.com.br/inversor>>. Acesso em: 23 de jun. de 2017.

SOUZA, R. d. Os sistemas de energia solar fotovoltaica. **Livro Digital de Introdução aos Sistemas Solares. Ribeirão Preto: Bluesol**, 2012.

STANISZEWSKI, L. A. **Desenvolvimento de uma plataforma utilizando a interface gráfica do Matlab® para monitoramento de um ambiente de cultivo controlado**. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

- TERUEL, B. J. Controle automatizado de casas de vegetação: Variáveis climáticas e fertigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 14, n. 3, 2010.
- THINGSPEAK. **About ThingSpeak**. 2017. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/thingspeak/>>. Acesso em: 13 de fev. de 2016.
- TREVELIN, F. C. et al. Estudo comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos. 2014.
- UNICOBA, D. T. **Manual Técnico UNIPOWER Série UP Bateria Chumbo-Ácida Selada Regulada por Válvula**. 2015.
- VIANA, E. P. T. Desempenho de cultivares de alface em diferentes condições ambientais. 2012.
- VOURDOUBAS, J. Possibilities of using renewable energy sources for covering all the energy needs of agricultural greenhouses. **Journal of Agriculture and Life Sciences**, v. 2, p. 111–118, 2015.
- VOURDOUBAS, J. Possibilities of using semi-transparent photovoltaic modules on rooftops of greenhouses for covering their energy needs. **Journal of Agricultural Studies**, v. 4, n. 1, p. 90–100, 2015.
- VOURDOUBAS, J. Overview of the use of sustainable energies in agricultural greenhouses. **Journal of Agricultural Science**, v. 8, n. 3, p. 36, 2016.
- WARMLING, E. K. Sistema didático para controle de temperatura em estufas de mudas de hortaliças. **Repositório de relatórios-Sistemas de Informação**, n. 2, 2014.
- YANO, A. et al. Electrical energy generated by photovoltaic modules mounted inside the roof of a north–south oriented greenhouse. **Biosystems engineering**, Elsevier, v. 103, n. 2, p. 228–238, 2009.
- YANO, A.; ONOE, M.; NAKATA, J. Prototype semi-transparent photovoltaic modules for greenhouse roof applications. **Biosystems engineering**, Elsevier, v. 122, p. 62–73, 2014.