



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU



Mayra Cristina Silva Santos

**USO DE FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA PARA SECAGEM E
CONSERVAÇÃO DE GRÃOS**

Ouro Preto, 2017

Mayra Cristina Silva Santos

**USO DE FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA PARA SECAGEM E
CONSERVAÇÃO DE GRÃOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Sávio Augusto
Lopes da Silva

Ouro Preto, 2017

S237u Santos, Mayra Cristina Silva.
Uso de fontes alternativas de energia para secagem e conservação de grãos
[manuscrito] / Mayra Cristina Silva Santos. - 2017.

57f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Energia solar. 3. Cereais - Milho - Secagem. I. Silva, Sávio Augusto Lopes da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

Monografia defendida e aprovada, em 05 de setembro de 2017, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva - Orientador



Prof. Dr. Luiz Fernando Rispoli Alves – Professor Convidado



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro – Professor Convidado

AGRADECIMENTOS

À Deus, por guiar e abençoar meus caminhos.

Aos meus pais, pelo amor, apoio e confiança.

À Mayara, por estar sempre presente.

À minha família e amigos, que tornaram mais doce a minha jornada.

Aos professores da UFOP pelo conhecimento compartilhado, em especial ao Prof. Sávio pela orientação.

RESUMO

Com a globalização, a queima de combustíveis fósseis vem sendo realizada em grande escala. Em virtude disso, torna-se necessário o uso de fontes alternativas de energia para reduzir a emissão de poluentes causadores do efeito estufa. A energia solar, por ser renovável, se destaca como uma fonte de energia alternativa, podendo ser empregada na secagem de grãos substituindo as fontes já utilizadas que causam impactos ambientais. Nesse sentido, o presente estudo buscou analisar o processo de secagem de grãos de milho em um secador de leito fixo, utilizando as energias solares térmica e fotovoltaica como fontes de energia. Para isso, inicialmente foi realizado um levantamento bibliográfico sobre fontes de energia, grãos de milho, secagem e armazenagem de grãos, e sensores. Posteriormente, foi realizado o cálculo do tempo de secagem e das potências necessárias à realização do processo, seguido do dimensionamento do sistema solar proposto. Com base nos resultados obtidos, foi constatado que o sistema não é viável, considerando pequenos produtores.

Palavras-chave: energias renováveis; energia solar; secagem de grãos de milho

ABSTRACT

With the globalization, the burning of fossil fuels have significantly risen over the last years. In view of that, the use of alternative energy sources has become one way to reduce the emission of greenhouse gases. The solar energy, since it is renewable, it is considered as an alternative energy source, moreover it can be used for the grain drying process, replacing the energy sources that cause environmental problems. In such context, the objective of this research is to analyse the corn grains drying process through a fixed-bed dryer, using solar thermal and photovoltaic energy as sources of energy. In this regard, initially it was performed a survey about energy sources, corn grains, grain drying and storage, and sensors. Subsequently, it was performed the calculation of the drying time and the required power for the project realization, followed by the design of the proposed solar system. Based on the results obtained, it appeared that this system is not feasible, taken into consideration small producers.

Keywords: renewable energy; solar energy; corn grains drying process.

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrnica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN – Balanço Energético Nacional

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FAO/INCRA – Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação /

Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Oferta e demanda nacional de milho	21
Tabela 3.1 – Teores de umidade para colheita mecanizada e armazenagem segura, em % b.u.	31
Tabela 3.2 – Massa específica granular, em kg.m^{-3} , de algumas espécies de grãos.....	32
Tabela 3.3 – Umidades de equilíbrio do milho, % b.u., em função da temperatura e umidade relativa do ar de secagem.....	33
Tabela 5.1 – Dados base para os cálculos	44
Tabela 5.2 – Resultados obtidos	44
Tabela 5.3 – Relação de equipamentos e custos para implantação do sistema solar na secagem de grãos	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Matriz elétrica brasileira	3
Figura 2.2 – Distribuição do aproveitamento de energia solar.....	15
Figura 2.3 – Média anual da irradiação diária no Brasil	15
Figura 2.4 – Relação entre tecnologias, temperaturas e aplicações.....	17
Figura 2.5 – Coletor solar plano fechado	18
Figura 2.6 – Esquema e vista em corte de uma célula fotovoltaica.....	19
Figura 2.7 – Sistema fotovoltaico.....	20
Figura 2.8 – Secador de leite fixo.....	23
Figura 2.9 – Representação esquemática da montagem de um termopar.....	25
Figura 2.10 – Sensor de temperatura	26
Figura 2.11 – Medidor de vazão para gases Dwyler	26
Figura 2.12 – Sensor de umidade HIH-4000.....	27
Figura 2.13 – Sensor de nível Microhard	27
Figura 3.1 – Silo protótipo.....	28
Figura 3.2 – Secador de grãos proposto	29
Figura 3.3 – Fluxograma do processo	30
Figura 3.4 – Gráfico psicrométrico	34
Figura 3.5 – Gráfico psicrométrico com curvas de U_e para o milho e determinação das propriedades psicrométricas do ar de secagem.....	35
Figura 3.6 – Gráfico de Shedd.....	38
Figura 4.1 – Instalação de um coletor solar.....	41
Figura 5.1 – Gráfico capacidade [t] x área do coletor térmico [m^2].....	45
Figura 5.2 – Gráfico capacidade [t] x potência das placas fotovoltaicas [W].....	45
Figura 5.3 – Gráfico capacidade [t] x controlador de carga [A].....	46
Figura 5.4 – Gráfico capacidade [t] x bateria [A.h].....	46
Figura 5.5 – Gráfico capacidade [t] x inversor [W]	47
Figura 5.6 – Gráfico gastos totais.....	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Contextualização	10
1.2 Justificativa.....	11
1.3 Objetivos.....	12
1.3.1 Objetivo geral	12
1.3.2 Objetivos específicos.....	12
1.4 Estrutura do trabalho	12
2 REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1 Fontes de energia	13
2.1.1 Energia solar	14
2.1.1.1 Energia térmica.....	16
2.1.1.2 Energia fotovoltaica.....	18
2.2 Grãos de milho	21
2.3 Secagem de grãos	22
2.4 Armazenagem de grãos	24
2.5 Sensores	24
2.5.1 Sensor de temperatura	25
2.5.2 Sensor de vazão de ar	26
2.5.3 Sensor de umidade.....	26
2.5.4 Sensor de nível	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1 Seleção e cálculo de variáveis	30
4 PROJETO DO SISTEMA SOLAR COMO FONTE DE ENERGIA PARA SECAGEM DE GRÃOS	40
4.1 Projeto do sistema de aquecimento do ar	40
4.2 Projeto do sistema fotovoltaico	41
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Com o advento da questão da sustentabilidade, faz-se necessário que o desenvolvimento econômico seja realizado de forma que se interfira o mínimo possível no ecossistema. Dessa forma, o uso de energias renováveis se apresenta como uma alternativa para manutenção dos recursos naturais.

Segundo Moraes Junior (2012), recursos renováveis são aqueles disponíveis, pela natureza, a uma taxa igual ou maior à taxa em que são consumidos. As energias renováveis são oriundas de recursos naturais que são capazes de se regenerar, como sol e vento, e são a melhor alternativa para diminuir o uso de combustíveis fósseis e minimizar os danos causados por eles.

As energias renováveis podem ser empregadas em diversas áreas, como no setor agrícola. Neste setor, a produção de grãos se destaca como um dos principais ramos, englobando várias etapas - desde o plantio, passando pela secagem, até o armazenamento.

Etapa fundamental do processo de produção, a secagem representa um consumo de cerca de 15% da energia total da etapa de pós-colheita. A secagem de grãos consiste na remoção de parcela da água neles contida, visando sua conservação para o consumo e/ou armazenagem (COSTA, 2008). Para a realização da secagem, utiliza-se predominantemente a lenha como combustível. Porém, a queima da lenha para produção de energia contribui com o agravamento do efeito estufa, causador do aquecimento global.

A secagem pode ser realizada de duas formas: natural ou artificial. Para Silva et al. (2015), a secagem natural é caracterizada por utilizar a radiação solar para aumentar o potencial de secagem do ar, enquanto que a artificial, realizada com uso de secadores, força a passagem de ar aquecido entre os grãos por determinado tempo. A secagem artificial desponta como melhor método, uma vez que possui tempo de secagem muito menor, todavia, requer maior investimento inicial.

Assim, de forma a minimizar o impacto ambiental causado pela queima do combustível realizada nas secagens convencionais e visando reduzir custos de implementação e de operação, propõe-se o emprego de energias renováveis no processo de secagem de grãos.

O presente trabalho tem como objeto de estudo a secagem de grãos de milho, um dos grãos mais cultivados no mundo, utilizando energias renováveis. Para a realização da secagem, a energia térmica será utilizada para aquecer o ar de secagem e a energia fotovoltaica será fonte de energia elétrica.

1.2 Justificativa

A produção de grãos é um dos principais ramos do setor agrícola mundial, e no Brasil não é diferente. A CONAB (2017) estima que na safra 2016/2017 haja um recorde de produção nacional de grãos, onde espera-se colher 237,2 milhões de toneladas de grãos, representando um aumento de 27,1% em relação à safra anterior. Com relação ao milho, um dos grãos mais cultivados no mundo, estima-se que a produção nessa safra seja de 96026,2 mil toneladas, o que representa um acréscimo de 44,3% em relação à safra passada. Ainda de acordo com a CONAB (2017), assim como a oferta, a demanda pelo milho também vem crescendo consideravelmente.

Para que a demanda seja atendida, torna-se indispensável o investimento em todo o processo produtivo do milho. Porém, segundo a Embrapa (2011), grande parcela dos produtores de milho é formada por agricultores familiares. A agricultura familiar pode ser definida como uma forma de organização produtiva onde são levados em conta não só a produção/rentabilidade econômica, como também a meta e as necessidades da família (FAO/INCRA, 1995). Algumas de suas características marcantes, como a menor utilização de insumos e condições técnicas, sociais e econômicas desfavoráveis, dificultam o investimento desses produtores no aumento da produção de grãos.

Adicionalmente, no que tange ao ponto de vista ambiental, torna-se pertinente que o processo de secagem ocorra de uma forma que seja menos nociva ao meio ambiente.

Dessa forma, justifica-se a implantação de energias renováveis no processo de secagem de grãos. Devido ao fato de já existirem na literatura muitos trabalhos que abordam a instrumentação e o controle de secadores que utilizam combustíveis convencionais durante o processo, este trabalho tem como foco o estudo e a aplicação de energias renováveis em um secador de leito fixo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver um estudo sobre a secagem de grãos em um secador de leito fixo com a utilização de energias renováveis como fonte de calor e de energia elétrica, e verificar sua viabilidade.

1.3.2 Objetivos específicos

- Fazer uma revisão bibliográfica com o intuito de explicar os conceitos envolvidos durante o processo de secagem de grãos;
- Determinar as variáveis que influenciam na secagem de grãos de milho, e a partir delas, calcular o tempo necessário à secagem;
- Fazer a análise energética necessária ao processo;
- Dimensionar os sistemas solares, calculando a área do coletor solar e definindo o painel fotovoltaico;
- Verificar a viabilidade do sistema proposto.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho encontra-se organizado em seis capítulos, incluindo a presente introdução. O segundo capítulo apresenta a revisão da literatura, enquanto o terceiro descreve o processo de secagem, por meio de figura e fluxograma, além de definir e calcular variáveis do processo. O projeto do sistema solar encontra-se no quarto capítulo. Por fim, é realizada uma análise dos resultados, e são apresentadas as considerações finais, recomendações futuras e referências bibliográficas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

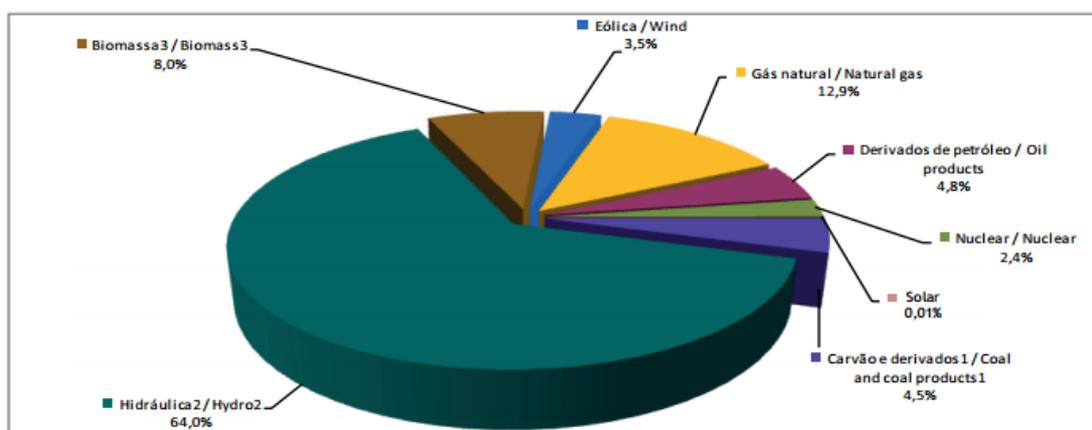
2.1 Fontes de energia

Inúmeras são as fontes de energia disponíveis em nosso planeta. Elas podem ser divididas em dois grupos: as fontes de energia renováveis e não renováveis.

As fontes renováveis são aquelas que possuem capacidade de regeneração, ou seja, são fontes contínuas e não se esgotam. Alguns exemplos são: sol, vento, rios, matéria orgânica, etc. A grande vantagem é que seu uso causa pequeno impacto no meio ambiente.

As fontes não renováveis são aquelas que, apesar de serem produzidas pela natureza, se esgotam devido ao uso a longo tempo. Dentre elas, podemos citar o gás natural, o petróleo e o carvão mineral.

De acordo com o BEN (2016), 64% da matriz elétrica brasileira é proveniente de hidrelétricas. A Figura 2.1 apresenta a estrutura da matriz elétrica brasileira no ano de 2015.



Notas/ Notes:

¹ Inclui gás de coqueria/ Includes coke oven gas

² Inclui importação de eletricidade/ Includes electricity imports

³ Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações/ Includes firewood, sugarcane bagasse, black-liquor and other primary sources

Figura 2.1 – Matriz elétrica brasileira

Fonte: BEN (2016)

Segundo o BEN (2016), a oferta de energia hidráulica no Brasil registrou um decréscimo de 3,7% no ano de 2015 com relação ao ano anterior, enquanto que no consumo constatou-se a queda de 1,8%, o que implica que ainda se consome mais do que se produz. Fatores como: aumento da renda per capita, sazonalidade e a falta de interligação do sistema de transmissão fazem com que a capacidade de geração e

distribuição de energia elétrica não consiga acompanhar o consumo. Assim, é necessário que o país melhore a distribuição, racionalize o uso e invista na utilização de outros tipos de energia.

A queima de combustíveis fósseis, realizada em grande escala para geração de energia, gera altos índices de poluição atmosférica, causando assim aquecimento global, chuvas ácidas e o efeito estufa. Portanto, torna-se necessário desenvolver novas tecnologias para suprir a atual demanda de energia.

A produção de energia por meio de fontes alternativas desponta como uma possível solução para essa crise energética. Alternativas energéticas são as fontes primárias de energia e as tecnologias usadas no processo de transformação e conversão, no armazenamento, no controle, na automação e na eficiência energética, visando a produção e o uso de eletricidade, calor ou movimento (CEMIG, 2012). As energias renováveis, devido à disponibilidade de algumas fontes em terras brasileiras, aos custos e à preservação ambiental, despontam então como uma solução viável.

Neste trabalho, serão abordados dois tipos de energias renováveis: as energias solares térmica e fotovoltaica, que serão detalhadas a seguir.

2.1.1 Energia solar

A energia solar, como o próprio nome diz, é aquela proveniente do sol, e é fonte de luz e calor. Quase todas as fontes de energia são formas indiretas da energia solar, como por exemplo, a energia eólica, em que os ventos são formados devido à circulação atmosférica causada pelo aquecimento desigual da atmosfera.

A energia solar tornou-se amplamente utilizada para a produção direta de eletricidade e também para aplicações térmicas (LIANG et al., 1998).

O aproveitamento da energia solar pode se dar sob duas formas: passiva ou ativa. Na forma passiva, a penetração da radiação solar em edificações possibilita o aproveitamento do calor, para o aquecimento, e da iluminação natural. Já a forma ativa é caracterizada pela existência de um processo de transformação, onde a energia solar é convertida em energia elétrica ou térmica. A distribuição do aproveitamento direto da energia solar é exibida na Figura 2.2.

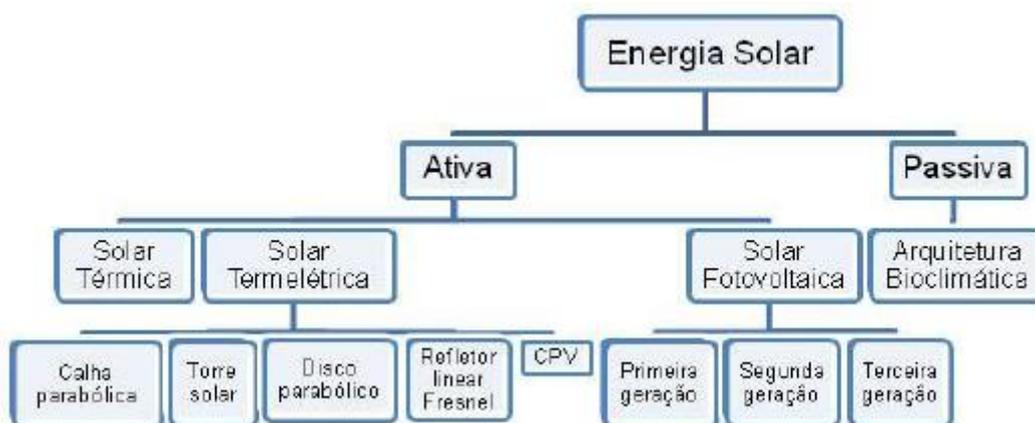


Figura 2.2 – Distribuição do aproveitamento da energia solar

Fonte: CEMIG (2012)

A energia solar que incide sobre a superfície terrestre é aproximadamente 10 mil vezes maior que o consumo energético mundial (TIBA, 2000). A radiação solar, energia emitida pelo sol e transmitida sob a forma de radiação eletromagnética, pode ser utilizada como fonte de energia térmica ou ser convertida em energia elétrica. Ela depende de condições climáticas e atmosféricas, portanto sua disponibilidade varia e busca-se maximizar seu aproveitamento. A Figura 2.3 mostra o mapa da média anual da irradiação solar diária incidente em um plano de acordo com sua latitude no Brasil.

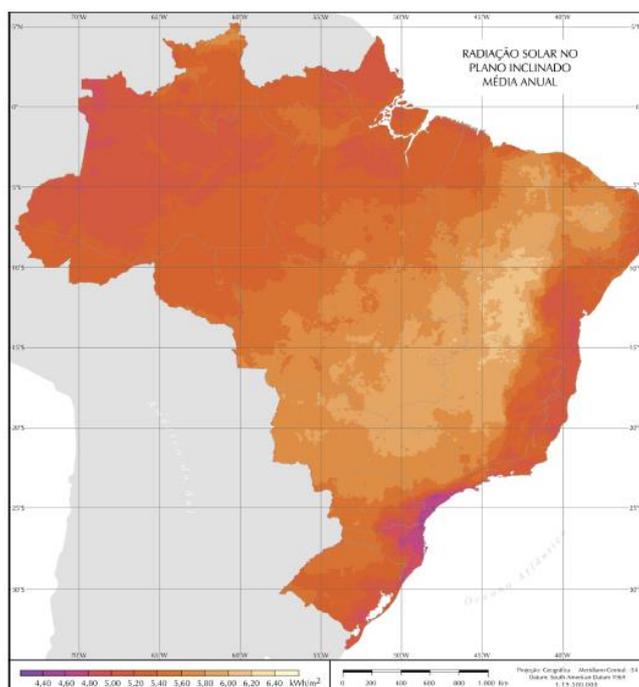


Figura 2.3 – Média anual da irradiação diária no Brasil

Fonte: Pereira et al. (2006)

De acordo com Pereira et al. (2006), constatou-se que a região ao norte da Bahia possui o maior nível de irradiação, 6,5 kWh/m², e que o menor valor, 4,25 kWh/m², é encontrado no litoral norte de Santa Catarina. O estado de Minas Gerais possui um valor relativamente alto, com destaque às regiões do triângulo, noroeste e norte. Portanto, o uso de energia solar no estado se torna viável.

Serão explanadas a seguir duas formas de energia solar: a térmica e a fotovoltaica.

2.1.1.1 Energia térmica

A energia térmica aproveita, sob forma de calor e por meio do processo termodinâmico, a energia solar para aquecimento de água, geração de energia elétrica e secagem de produtos agropecuários (VANNI, 2008).

A energia solar é captada por coletores ou por concentradores solares, que através de processos térmicos, é transformada em calor. As tecnologias e os equipamentos utilizados são definidos de acordo com a faixa de temperatura necessária para a realização do processo estabelecido, conforme explicitado a seguir:

- Temperaturas baixas (até 90°C): usadas principalmente para o aquecimento de água. São usados os coletores planos ou os parabólicos de baixa concentração;
- Temperaturas médias (90°C a 150°C): as aplicações destinam-se ao condicionamento do ar em meio industrial, utilizando coletores do tipo concentrador parabólico composto ou tubos de vácuo;
- Temperaturas altas (150°C a 300°C): a tecnologia mais usada é a dos concentradores cilindro-parabólicos, utilizado em aplicações industriais e na produção de eletricidade;
- Temperaturas muito altas (superior a 300°C): os concentradores cilindro-parabólicos, tipo torre ou disco parabólicos aplicam-se em processos a vapor e para a produção de eletricidade.

A Figura 2.4 apresenta cada tecnologia, sua faixa de temperatura de operação e sua aplicação.

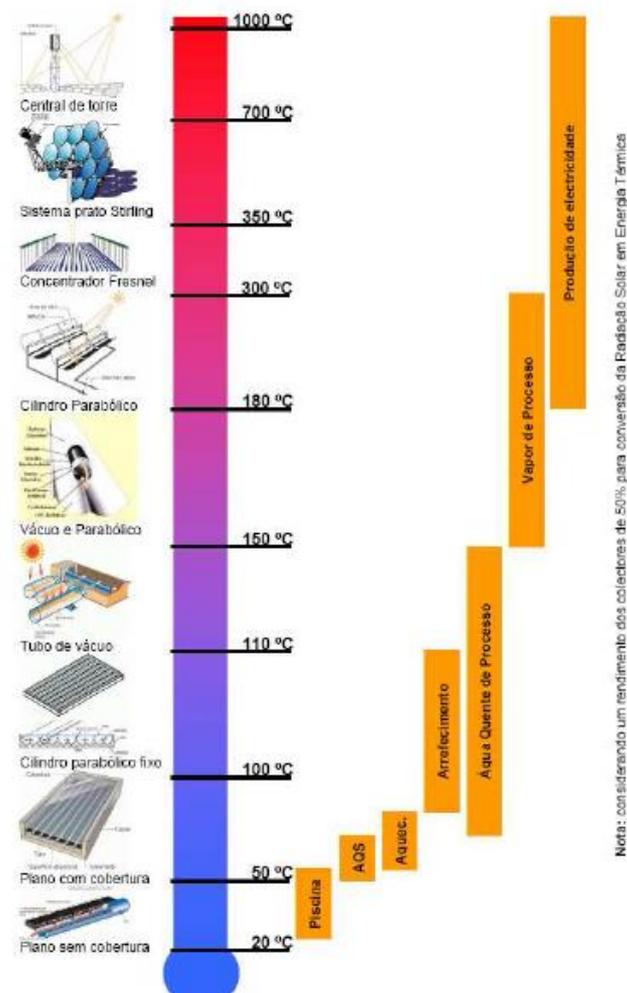


Figura 2.4 - Relação entre tecnologias, temperaturas e aplicações

Fonte: Martins (2009)

O coletor solar plano, muito utilizado na secagem de grãos a baixas temperaturas, objeto desse estudo, recebe a energia oriunda do sol e a transforma em energia térmica. É constituído por uma caixa que possui em seu interior tubos, geralmente feitos de cobre devido à sua resistência a corrosão e alta condutividade térmica, por onde circulam o fluido. As aletas de captação, ou placa absorvedora, são responsáveis pela absorção da energia solar e por convertê-la em energia térmica, transmitindo-a aos tubos, e são revestidas de escuro para a maior absorção da radiação solar incidente. Sua cobertura é transparente para minimizar interferências na passagem dos raios solares. A Figura 2.5 exibe um coletor plano fechado e seus principais componentes.

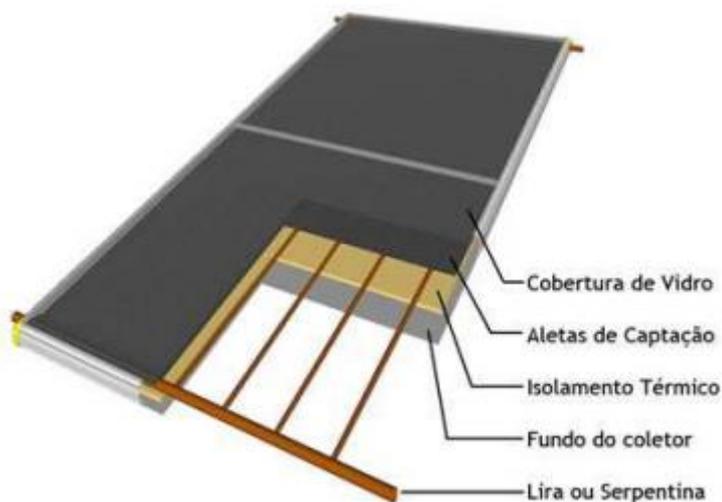


Figura 2.5 - Coletor solar plano fechado

Fonte: Garcia (2014)

O isolamento térmico reveste a caixa com o objetivo de minimizar as perdas de calor para o meio. Os materiais mais utilizados como isolantes no Brasil são: lã de vidro e espuma de poliuretano.

2.1.1.2 Energia fotovoltaica

A energia solar pode ser convertida em energia elétrica através da absorção da luz por uma superfície semicondutora, fato que ficou conhecido como efeito fotovoltaico. Esse efeito, descrito por Edmond Becquerel em 1839, consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de um material semicondutor devido à absorção da luz (CRESESB, 2006). A energia dos fótons presentes na luz solar é transferida para os elétrons, que então podem se movimentar, gerando a energia elétrica. Os fótons são convertidos em energia elétrica através das células solares. Se combinadas com uma bateria, essa energia pode ser armazenada.

O material mais usado para fabricação de células solares é o Silício, presente na natureza sob a forma de dióxido de Silício SiO_2 , encontrado abundantemente na areia e no granito. Através da aplicação de métodos adequados, é possível obtê-lo em sua forma pura. Em sua forma cristalina, é um mau condutor elétrico, portanto é necessário realizar a sua dopagem, acrescentando-se pequenas porcentagens de Fósforo e Boro. Da dopagem com o Fósforo, é obtido um material com elétrons livres, ou seja, de carga negativa (Silício tipo N). Já a dopagem com o Boro resulta em um material com déficit de elétrons,

as lacunas, de carga positiva (Silício tipo P). Uma célula fotovoltaica é composta por uma camada estreita de material tipo N e por uma camada maior de material tipo P, como mostrado na Figura 2.6.

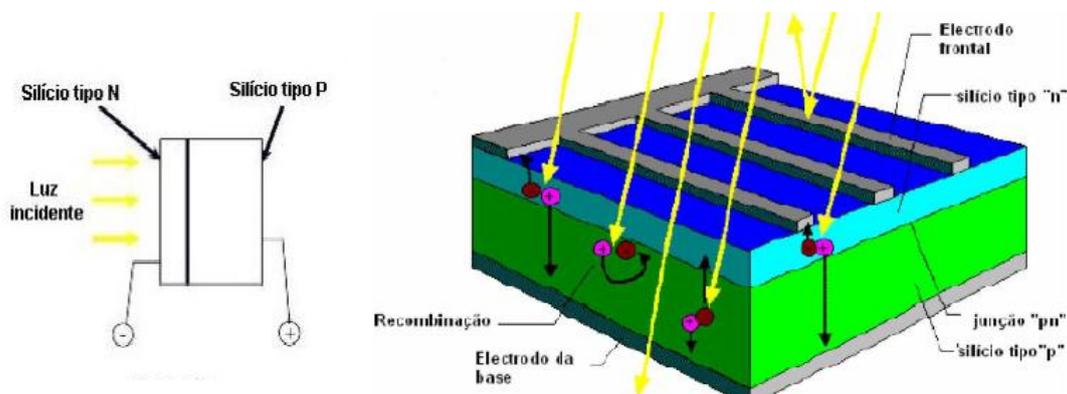


Figura 2.6 – Esquema e vista em corte de uma célula fotovoltaica

FONTE: Subida (2015)

A união das duas camadas gera um campo elétrico devido ao fato dos elétrons livres do Silício tipo N irem para as lacunas do Silício tipo P. Quando incide luz sobre a célula, os fótons presentes na luz se chocam com os elétrons, fornecendo-lhes energia, e consequentemente eles podem se movimentar. Devido ao campo elétrico existente, eles são orientados a se deslocar da camada P à camada N através de um fio externo que liga as duas camadas, gerando assim um fluxo de elétrons (corrente elétrica). Enquanto houver incidência de luz sobre a célula haverá fluxo, e a quantidade energia produzida é diretamente proporcional à de luz incidente.

As células podem ser dispostas de diversas formas, sendo a montagem de painéis ou módulos solares a mais utilizada. Nela, as células são conectadas eletricamente formando arranjos para que se possa produzir tensão e corrente necessárias. A eficiência dos módulos é fortemente relacionada com a instalação correta, fatores como grau de inclinação e sombreamento são significativos. Porém, a eficiência não deve ser o fator determinante pela escolha de determinado módulo, a não ser que a área disponível para sua instalação seja limitada. Caso contrário, fatores como durabilidade, reputação do fabricante e custo também devem ser levados em consideração.

Um sistema fotovoltaico é exibido na Figura 2.7.

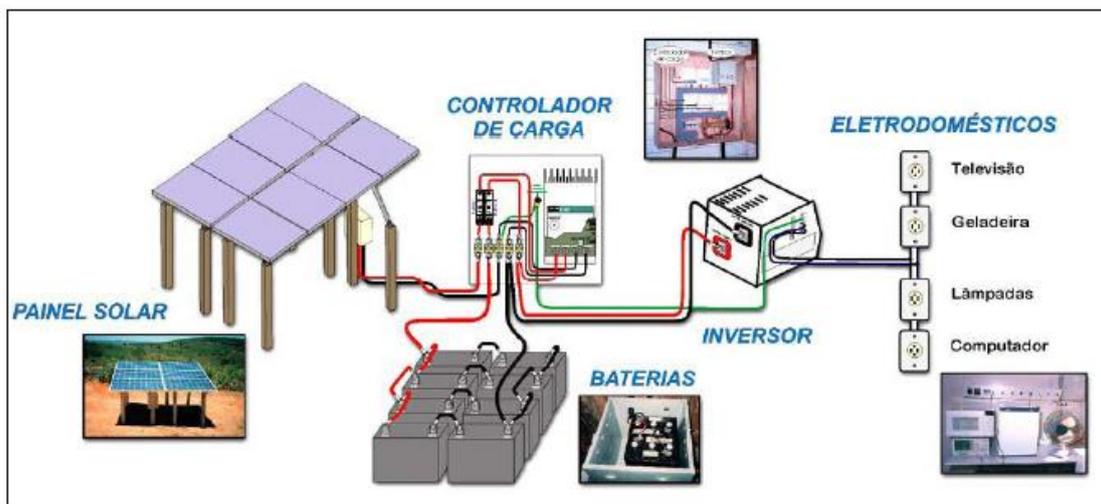


Figura 2.7 – Sistema fotovoltaico

Fonte: ANEEL (2005)

O painel solar pode ser composto de quantos módulos fotovoltaicos forem necessários, e é responsável pela geração da energia elétrica. As baterias armazenam a energia produzida, e o controlador de carga a protege contra sobrecarga ou descarga excessiva, além de direcionar a eletricidade gerada. O inversor converte a energia de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), para que assim seja possível usá-la em eletrodomésticos.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser operados em diferentes modos, sendo eles:

- Conectados à rede elétrica, repassando instantaneamente a energia gerada à rede, representando uma fonte de energia complementar;
- Em sistema isolado, alimentando diretamente as cargas, utilizado em locais sem energia elétrica convencional ou com funcionamento independente;
- Em sistema híbrido, paralelamente a outras fontes de energia renováveis.

Os sistemas isolados são usados no Brasil principalmente para o suprimento da demanda por eletricidade em comunidades rurais ou isoladas. Eles apresentam inúmeras vantagens, como a longevidade das instalações e a autonomia do sistema, mas o elevado custo de instalação desponta como a grande desvantagem.

Até 2012, o grande obstáculo da difusão da energia fotovoltaica era a ausência de regulamentação e normas técnicas. Em abril do mesmo ano, a ANEEL (2012) aprovou a resolução normativa nº 482, que permite a micro e a minigeração de energia elétrica a

partir de fontes renováveis e alternativas com sistemas de geração distribuída conectados às redes elétricas de baixa tensão.

2.2 Grãos de milho

O milho, juntamente com o arroz e a soja, é um dos grãos mais cultivados no Brasil. De acordo com o IBGE (2017), juntos, esses três produtos representam 93% da produção e 87,1% da área a ser colhida. Com relação ao milho, sua produção registrou aumento de 39,6% em relação à 2016.

É um cereal com ampla aplicabilidade e sua utilização vai desde a alimentação animal, despontando como principal ração para aves e suínos devido ao seu alto teor de carboidratos, até a indústria na produção de filmes e embalagens biodegradáveis. A qualidade física e química dos grãos é, portanto, determinada pela sua utilização final. Por exemplo, grãos de milho com altos teores de óleo (6 a 7,5%) e de proteína (>12%) são destinados à alimentação animal, enquanto que os que possuem alto teor de ácido graxo oleico são usados para a produção de margarinas e óleos de fritura especiais.

A semente do milho desenvolveu-se significativamente nos últimos anos. O avanço da biotecnologia proporcionou a flexibilidade de seu cultivo em regiões de distintas condições de clima e solo, gerando grande efeito na produção.

À medida em que o poder aquisitivo da população aumenta, aumenta também o consumo de alimentos de origem vegetal, o que acabava fazendo com que a demanda do milho aumentasse. Esse fator, acrescido ao panorama mundial atrativo do cereal, impulsionou a sua produção no país. A Tabela 2.1 mostra a evolução da oferta e da demanda de milho no Brasil.

Tabela 2.1 - Oferta e demanda nacional de milho

SAFRA	ESTOQUE INICIAL	PRODUÇÃO	IMPORTAÇÃO	SUPRIMENTO	CONSUMO	EXPORTAÇÃO	ESTOQUE FINAL
2011/12	4.459,6	72.979,5	774,0	78.213,1	51.903,0	22.313,7	3.996,4
2012/13	3.996,4	81.505,7	911,4	86.413,5	53.287,9	26.174,1	6.951,5
2013/14	6.951,5	80.051,7	790,7	87.793,9	54.541,6	20.924,8	12.327,5
2014/15	12.327,5	84.672,4	316,1	97.316,0	56.742,4	30.172,3	10.401,3
2015/16	10.401,3	66.530,6	3.338,1	80.270,0	53.387,8	18.883,2	7.999,0
2016/17	7.999,0	93.835,7	500,0	102.334,7	56.100,0	26.000,0	20.234,7

Fonte: CONAB (2017)

Portanto, devido a esse crescimento, é necessário que se invista tanto na etapa de produção como também na etapa de pós-colheita.

Tema deste trabalho, a secagem de grãos, descrita a seguir, é uma etapa de fundamental importância para a manutenção da qualidade e para que não haja perda dos

grãos, proporcionando assim o aumento da quantidade de grãos pronta para ser comercializada.

2.3 Secagem de grãos

Segundo Silva et al.(2000), a secagem é uma etapa de pré-processamento de grãos em que ocorre a transferência simultânea de calor e massa (umidade) entre o ar de secagem e o grão, visando a remoção de parte da água contida nele.

A transferência de calor do ar para o grão se dá pela diferença de temperatura entre eles. Já na transferência de massa do grão para o ar, devido às suas diferenças de pressão de vapor d'água, a água se movimenta do interior para a superfície do grão, e então evapora.

A maioria dos grãos deve ser colhida quando o teor de umidade é alto, o que diminui as perdas principalmente pelo menor tempo de exposição dos grãos na lavoura, reduzindo assim os ataques causados por bactérias e fungos. Por isso, a secagem é um processo muito relevante, e além de preparar o produto para a armazenagem e disponibilizar área para novos cultivos devido à antecipação da colheita, é de fundamental importância na manutenção da qualidade dos grãos, visto que o baixo teor de umidade reduz as atividades microbianas.

Todavia, essa retirada da umidade deve ser realizada de forma que algumas características importantes do produto, como qualidade nutritiva, aparência e viabilidade, sejam preservadas. Através de estudos, concluiu-se que a temperatura de secagem é capaz de afetar características físicas e químicas dos grãos (SILVA ET AL., 2000). Para que tais danos sejam evitados, de acordo com Martins, Franco e Oliveira (1999), tais parâmetros como tempo de exposição, velocidade do ar de secagem e temperatura devem ser definidos para cada tipo de produto, em função do processo de secagem utilizado.

A secagem pode ser feita de forma natural ou artificial. Na secagem natural, o produto é disperso na planta de secagem, e seu processo se dá sem a interferência humana. A secagem artificial é realizada em secadores mecânicos, onde o ar aquecido é impulsionado por ventiladores, e pode ser realizada a baixa ou a alta temperatura. Na modalidade a baixa temperatura, a temperatura do ar de secagem é superior em até 10°C que a temperatura ambiente, enquanto que na de alta temperatura o ar de secagem é aquecido em mais de 10°C que a temperatura ambiente.

Um secador amplamente usado para sistemas de secagem, devido ao seu menor custo e a sua simples configuração, é o de leito fixo. Nele, os grãos são colocados em silos, geralmente metálicos, com o piso perfurado para promover a passagem do ar quente, proveniente da fornalha e de temperatura monitorada por um termômetro, que é impelido pelo ventilador. Nos secadores em que a camada de grãos permanece estática, recomenda-se que o revolvimento dos grãos seja feito a cada três horas, para que eles sequem uniformemente. Para evitar esse tipo de trabalho manual, são comercializados secadores com um sistema mecânico para fazer o revolvimento, conforme a Figura 2.8.

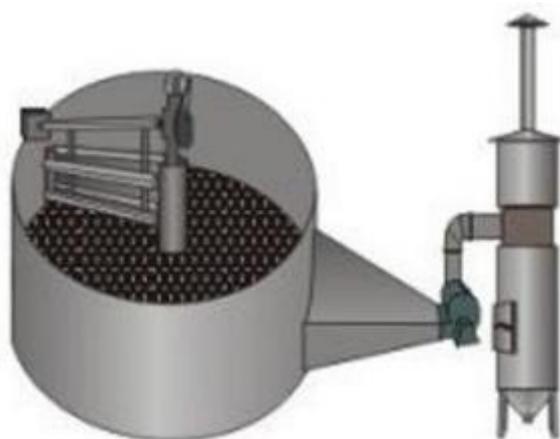


Figura 2.8 - Secador de leito fixo

Fonte: Polidryer Indústria e Comércio de Máquinas Ltda (2017)

No Brasil, aproximadamente 80% da produção de cereal e grãos é secada naturalmente e cerca de 75% é oriunda de produtores de pequeno e médio porte (MARTINS, FRANCO e OLIVEIRA, 1999). Sabendo-se das desvantagens da secagem natural, como o período de tempo relativamente longo do processo e conseqüentemente a vulnerabilidade ao ataque de pragas, conclui-se que essa não é a técnica mais rentável. Porém, devido ao alto custo da secagem artificial, o que acaba restringindo seu uso em produções de pequena e média escala, faz-se necessário buscar uma alternativa para que os produtores consigam aumentar a produtividade sem aumentar muito o custo. Para tanto, a implantação da energia solar no processo de secagem, objeto de estudo do presente trabalho, desponta como uma possível solução, visando proporcionar uma tecnologia simples e de baixo custo, porém eficaz.

Para que seja realizado o aproveitamento da energia solar na secagem de grãos, recomenda-se que seja adotado o sistema de secagem a baixa temperatura, devido à menor quantidade de energia consumida. Além disso, para Martins et al. (2002), os grãos secos

a temperaturas baixas possuem qualidade superior aqueles que são secos a altas temperaturas, já que o produto tem uma redução pouco significativa de volume e não apresenta trincas ou alteração de cor.

2.4 Armazenagem de grãos

A armazenagem tem como objetivo guardar e conservar o produto. De acordo com Martini, Prichoa e Menegat (2009), uma armazenagem de grãos apropriada é fundamental para que a qualidade dos grãos seja preservada, além de minimizar perdas e suprir a demanda nos períodos de entressafra. Para Brooker, Bakker Arkema e Hall (1974), a armazenagem não é capaz de melhorar a qualidade dos grãos.

Alguns fatores podem afetar a qualidade e a quantidade dos grãos armazenados, como a respiração dos grãos, os roedores, os insetos, os pássaros e os fungos. Portanto, apenas boas práticas de armazenamento são capazes de conservar as qualidades físicas e fisiológicas dos grãos (BAUDET e VILELA, 2000).

Os seguintes parâmetros devem ser levados em consideração no que diz respeito à armazenagem de produtos: a determinação do espaço de armazenagem, o layout do armazém e projetos de docas, a configuração do armazém, a disposição dos produtos no estoque de acordo com o tipo de produto, tipo de cliente ou rotatividade (MORABITO e IANNONI, 2007).

No Brasil, a produção de grãos tem crescido consideravelmente, mas a estrutura de armazenagem não segue por esse caminho. Segundo os registros da CONAB (2016), a capacidade brasileira de armazenagem, no ciclo agrícola 2015/2016, é de 152 milhões de toneladas para uma safra estimada em 210,5 milhões de toneladas, o que resulta em um déficit de 58,5 milhões de toneladas.

Portanto, é necessário que o Brasil invista não somente na produção de grãos como também nas etapas pós-colheita, que são necessárias para que a armazenagem dos grãos colhidos seja feita de forma a garantir a qualidade dos grãos.

2.5 Sensores

Conforme Thomazini e Albuquerque (2011), os sensores são dispositivos sensíveis à alguma forma de energia do ambiente, que é então relacionada com uma grandeza física que precisa ser mensurada.

Os sensores podem ser divididos basicamente em dois tipos: analógicos e digitais. Os analógicos são aqueles que podem assumir na saída qualquer valor intermediário que esteja dentro da sua faixa de operação, enquanto que os digitais podem alternar apenas entre os níveis alto (high ou “1”) ou baixo (low ou “0”).

Para o desenvolvimento do presente trabalho, serão especificados os sensores de temperatura, de vazão de ar, de umidade e de nível.

2.5.1 Sensor de temperatura

O termopar é um sensor de temperatura constituído por dois metais diferentes unidos em uma de suas extremidades. O extremo em que os fios são soldados recebe o nome de junção de medição (ou junta quente), enquanto que o outro extremo, chamado de junção de referência ou junta fria, vai ser ligado a um instrumento medidor. A diferença de temperatura nas extremidades dos fios gera uma tensão elétrica, que é função da diferença de temperatura e do par metálico que compõe as junções, fenômeno descoberto por Thomas Seebeck em 1822. Quando a temperatura da junta fria é mantida constante, nota-se que a tensão é em função da temperatura da junta quente. Assim, conhecidos os valores da temperatura da junta fria e da tensão, determina-se a temperatura da junta quente para um determinado par metálico. A Figura 2.9 mostra o esquema de ligação de um termopar para a realização de medições.

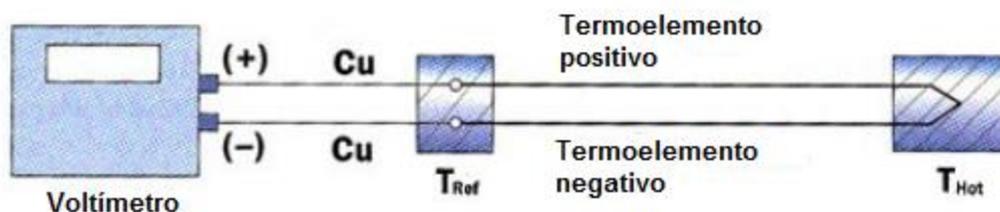


Figura 2.9 - Representação esquemática da montagem de um termopar

Fonte: Bonilla (2016)

Devido ao baixo custo, à sua ampla faixa de temperatura de medição e à sua popularidade, o termopar tipo K é um dos mais utilizados. Seu termoelemento positivo é um fio de Cromel, composto por Ni (90%) e Cr (10%), enquanto que um fio de Alumel, formado por Ni (95%) Mn (2%) Si1 (1%) e Al (2%), é o termoelemento negativo.

O cabo sensor de temperatura da Widitec (2017) é um termopar tipo K e é utilizado principalmente na secagem de cereais. Sua temperatura máxima de operação é de 200°C, e é apresentado na Figura 2.10.



Figura 2.10 - Sensor de temperatura

Fonte: Widitec (2017)

2.5.2 Sensor de vazão de ar

Os dispositivos medidores de vazão são responsáveis por medir a taxa de vazão, não linear ou linear, da massa (vazão mássica) ou do volume (vazão volumétrica) de um líquido ou de um gás.

Um sensor bastante utilizado em secadores de grãos é o medidor da Dwyler (2017), conforme apresenta a Figura 2.11, formado por um corpo que possui em seu interior um rotor cuja velocidade angular é diretamente proporcional à velocidade do fluido em questão. Um sensor, magnético ou indutivo, instalado no corpo do medidor é responsável por captar a movimentação das aletas do rotor, produzindo um trem de pulsos senoidal que é transformado em sinal de saída de alta impedância ou sinal analógico.



Figura 2.11 - Medidor de vazão para gases Dwyler

Fonte: Dwyler (2017)

2.5.3 Sensor de umidade

A umidade relativa do ar representa a quantidade de vapor de água contida em uma determinada área, e para sua medição, os sensores capacitivos são amplamente

utilizados. O material dielétrico do capacitor é o ar, e havendo variação em sua umidade ocorre uma variação no sinal devido ao aumento ou à diminuição de sua capacidade dielétrica.

O sensor HIH-4000 da Honeywell(2017) possui acurácia de 3,5%, faixa de operação de 0 a 100% de umidade relativa do ar sem condensação (25°C) e consumo máximo de corrente de 500 μ A. A Figura 2.12 ilustra seu encapsulamento.

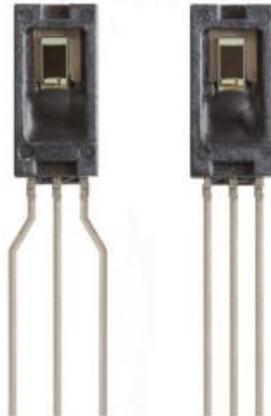


Figura 2.12 - Sensor de umidade HIH-4000

Fonte: Honeywell (2017)

2.5.4 Sensor de nível

Os sensores de nível são responsáveis por medir a altura do conteúdo, líquido ou sólido, de um reservatório. O sensor de nível infravermelho da Microhard (2017), exibido na Figura 2.13, é empregado no controle de materiais granulados, pós, líquidos e pastosos, e seu princípio de funcionamento se baseia na interrupção do feixe de luz invisível quando o material chega à posição em que o sensor está instalado. O dispositivo produz em sua saída um sinal conforme é encoberto e descoberto.



Figura 2.13 - Sensor de nível Microhard

Fonte: Microhard (2017)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho considerou-se o protótipo do silo desenvolvido por Monteiro (2002), conforme a Figura 3.1, em que sua forma circular possibilita uma secagem mais uniforme devido à sua melhor uniformidade de distribuição de ar. Formado por dois tambores de metal unidos por solda, cada um possui aproximadamente 0,83 m de altura e 0,57 m de diâmetro. O fundo é constituído por uma placa metálica perfurada, na lateral há um orifício com tampa por onde os grãos serão recolhidos, e o topo é aberto. A capacidade total do silo é de 0,42 m³. Sob ele há um plenum metálico de base quadrada de 1,0 m de lado e altura de 0,4 m, que possui em uma de suas laterais um elemento de conexão prismático e, em sua extremidade, um ventilador.

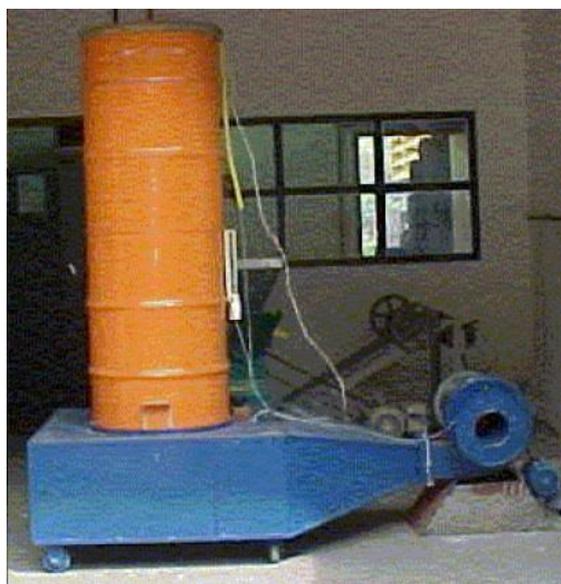
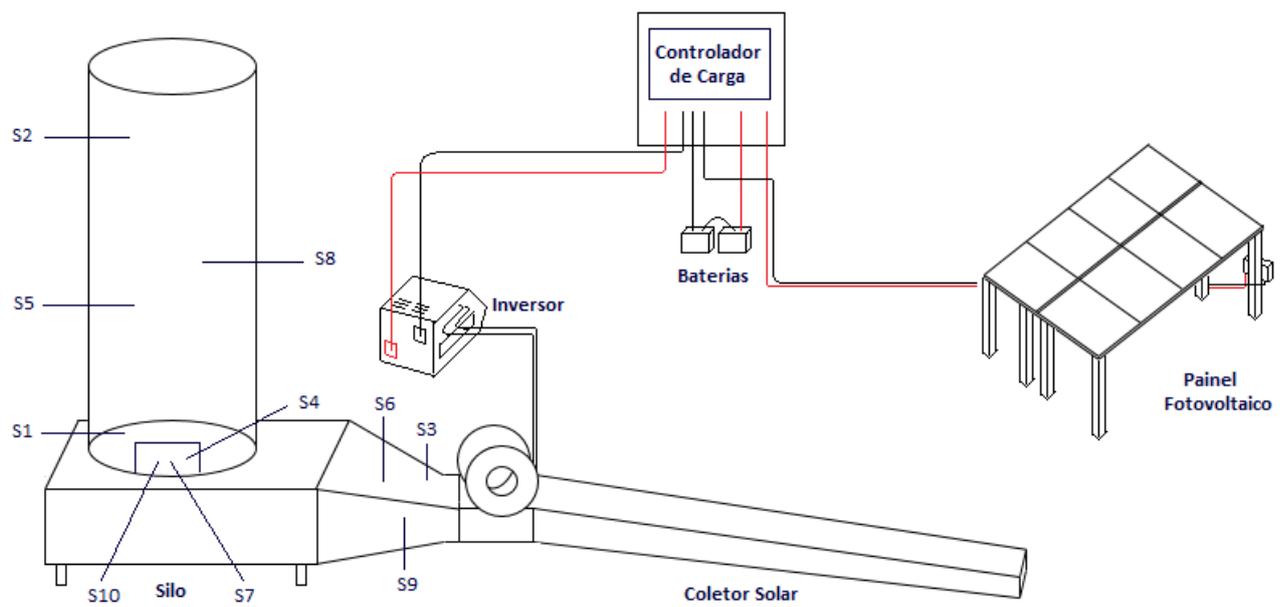


Figura 3.1 - Silo protótipo

Fonte: Monteiro (2002)

Como o objetivo do presente trabalho é a utilização de energias renováveis na secagem de grãos de milho, foram necessárias algumas adaptações no silo. Propôs-se então a inclusão de um coletor solar, de um painel fotovoltaico, de um inversor, de um controlador de carga e de um banco de baterias. A placa fotovoltaica converte a luz solar em energia elétrica, que aciona o motor do ventilador, insuflando o ar aquecido pelo coletor no silo secador, promovendo assim a secagem.

A Figura 3.2 apresenta o secador de grãos proposto neste trabalho.



- S1 – Sensor de nível – camada mínima
- S2 – Sensor de nível – camada máxima
- S3 – Sensor de umidade – ar de entrada
- S4 – Sensor de umidade – ar de saída
- S5 – Sensor de umidade – produto
- S6 – Sensor de temperatura – ar de entrada
- S7 – Sensor de temperatura – ar de saída
- S8 – Sensor de temperatura – produto
- S9 – Sensor de vazão – ar de entrada
- S10 – Sensor de vazão – ar de saída

Figura 3.2 - Secador de grãos proposto

Fonte: Elaborado pela autora

Dessa forma, foi elaborado o fluxograma do processo, exibido na Figura 3.3.

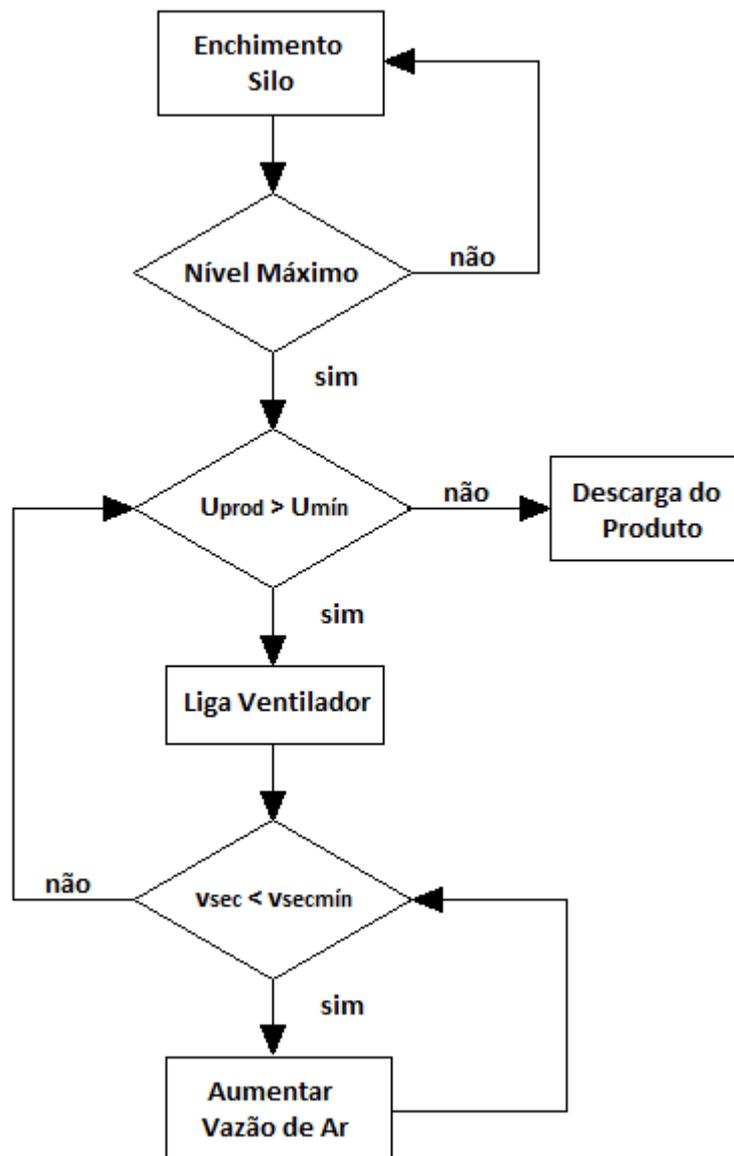


Figura 3.3 - Fluxograma do processo

Fonte: Elaborado pela autora

3.1 Seleção e cálculo de variáveis

Nesta seção, serão definidas e calculadas variáveis cruciais para a realização do processo de secagem de grãos de milho. Com relação ao dimensionamento, o sistema será projetado para operar em sua capacidade máxima.

A Tabela 3.1 apresenta os teores de umidade, em % b.u., para colheita e armazenagem de diferentes tipos de grãos, além dos teores esperados ao término do processo de secagem.

Tabela 3.1 - Teores de umidade para colheita mecanizada e armazenagem segura, em %

Produto	Máximo para Colheita	Ótimo para Colheita	Comum após Secagem	Armazenagem segura	
				1 Ano	5 Anos
Cevada	23	15 - 17	9	11	10
Milho	23	20 - 22	11	11	9 - 10
Arroz	21	17 - 19	11	11 - 12	9 - 11
Soja	-	-	-	11 - 12	9 - 10
Sorgo	26	23 - 26	9	11 - 12	9 - 10
Trigo	23	15 - 17	8	12 - 13	10 - 11

Fonte: Silva et al. (2000)

Como a secagem é um processo que gasta muita energia, e o objetivo é minimizar o seu gasto, baseado na tabela acima determinou-se que o milho deve ser colhido quando o seu teor de umidade for igual a 20% b.u.

Ao término do processo de secagem, espera-se que o teor de umidade dos grãos de milho seja de aproximadamente 14% b.u.

De acordo com Embrapa (2011), quando a secagem do milho é realizada a baixa temperatura, o fluxo de ar de secagem deve ser de 1,0 a 10 m³/min.t. Como o sistema está sendo projetado considerando a capacidade máxima, diminuindo assim o tempo de secagem, adotou-se o fluxo de ar de 10 m³/min.t.

Visto que a capacidade do silo é de 0,42 m³ e que o peso específico do milho é 750 kg/m³, podem ser carregados 315 kg do produto. Propõe-se que a quantidade de milho a ser seca seja de 270 kg, ou seja, 4,5 sacos, que enche o silo até 1,44 m e ocupa um volume de 0,36 m³.

Para calcular o tempo de secagem foi utilizado um dos métodos descritos por Silva et al. (2000), o balanço de energia entre os grãos e ar. Para tanto, considerou-se o aquecimento do ar devido ao atrito nas pás do ventilador 1 °C (SILVA et al., 2000); a temperatura do ar ambiente T = 17°C, segundo a Prefeitura Municipal de Ouro Preto; a umidade relativa (H) 80% (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2017) e o calor específico do ar (C_a) igual a 0,24 cal/g°C. A massa específica do milho (d) = 685,94 kg/m³ foi obtida por meio de uma interpolação da Tabela 3.2, explicitada a seguir.

Tabela 3.2 - Massa específica granular, em kg.m⁻³, de algumas espécies de grãos

Grãos	Umidade (%b.u.)	Massa Específica Granular	Grãos	Umidade (%b.u.)	Massa Específica Granular
Cevada	7,9	585,0	Arroz	12,0	586,0
	10,8	593,0		14,0	588,0
	13,3	593,0		16,0	605,0
	16,6	577,0		18,0	615,0
	19,5	569,0		Trigo	7,3
Milho	7,3	753,0	11,0		790,0
	13,0	737,0	14,1		756,0
	16,2	721,0	17,1		727,0
	19,5	689,0	19,3		703,0
	24,9	656,0	Milho BR 201	12,5	769,2
Sorgo	6,8	753,0		13,9	762,5
	12,0	753,0		14,8	757,8
	14,3	753,0		16,7	749,8
	18,6	737,0		18,1	737,3
	22,1	721,0	20,3	714,2	

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2000)

Como a umidade inicial do milho é de 20% b.u., escolheu-se os pontos $(x, f(x)) = (19,5; 689,0)$ e $(24,9; 656,0)$ para resolução da equação 1, conforme é demonstrado a seguir.

$$p(x) = \left(\frac{x - x_1}{x_0 - x_1} \right) \cdot f(x_0) + \left(\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right) \cdot f(x_1) \quad (1)$$

$$p(x) = [(x - 24,9) / (19,5 - 24,9)] \times 689 + [(x - 19,5) / (24,9 - 19,5)] \times 656$$

$$p(20) = 685,94$$

Para determinar o aumento na temperatura que o sistema de aquecimento do ar deve proporcionar para que se alcance o teor de umidade desejado, utilizou-se a Tabela 3.3, que indica, em % b.u., o teor de umidade de equilíbrio dos grãos em função da umidade relativa e da temperatura do ar de secagem.

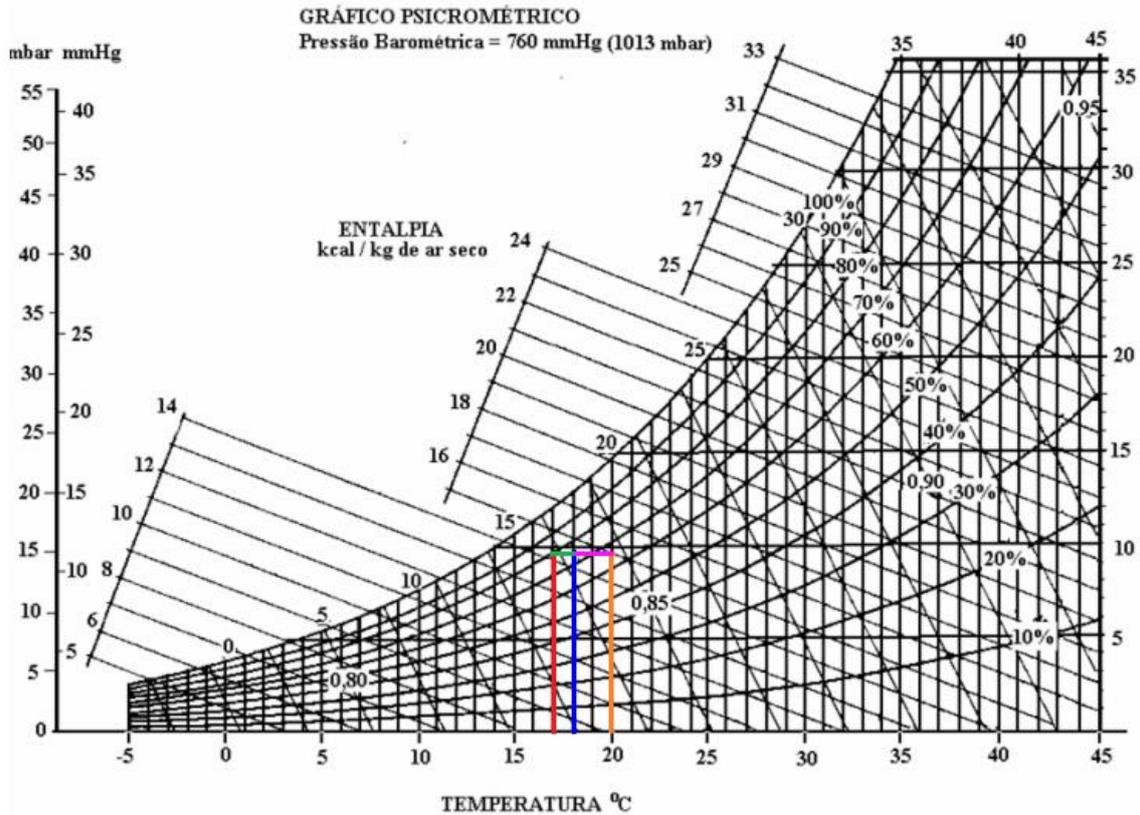
Tabela 3.3 - Umidades de equilíbrio do milho, % b.u., em função da temperatura e umidade relativa do ar de secagem

Temperatura. °C	Umidade relativa (%)						
	50	55	60	65	70	75	80
16	11,6	12,4	13,3	14,2	15,0	16,0	17,1
18	11,5	12,3	13,1	13,9	14,8	15,8	16,9
20	11,3	12,1	12,9	13,7	14,6	15,6	16,7
22	11,2	11,9	12,7	13,6	14,4	15,4	16,5
24	11,0	11,8	12,4	13,4	14,3	15,2	16,3
26	10,9	11,6	12,3	13,2	14,2	15,0	16,1
28	10,7	11,5	12,1	13,1	13,9	14,9	15,9
30	10,6	11,3	12,0	12,9	13,8	14,7	15,7
32	10,5	11,2	11,8	12,8	13,6	14,5	15,5
34	10,4	11,1	11,7	12,6	13,4	14,4	15,4

Fonte: Silva et al. (2000)

Pela Tabela 3.4, e considerando a temperatura e a umidade do ar ambiente (17 °C e 80%, respectivamente), tem-se que o teor de umidade dos grãos de milho é de 17% b.u.

Levando em conta o aquecimento do ar causado pelo ventilador (1 °C) e os dados 17 °C e 80%, obteve-se, por meio do gráfico psicrométrico exibido na Figura 3.4, que a umidade relativa do ar é de 75%. Este valor foi encontrado da seguinte forma: traçou-se uma reta vertical (vermelha) partindo da temperatura 17 °C até encontrar a curva de umidade relativa 80%. A partir dessa intersecção, traçou-se uma reta horizontal (verde) até o encontro da reta vertical (azul) referente à temperatura 18 °C. Tendo a temperatura (18 °C) e a umidade relativa (75%), o teor de umidade dos grãos é de 15,8% b.u., de acordo com a Tabela 3.3. Este valor é ainda superior ao desejado (14% b.u.). Dessa forma, aumentando-se a temperatura em 2 °C e obtendo sua umidade relativa (65%) de forma análoga à descrita anteriormente, em que a linha horizontal é representada pela cor rosa e a vertical pela cor laranja, observa-se que o teor de umidade dos grãos cai para 13,7% b.u. Portanto, conclui-se que o sistema de aquecimento deve aquecer o ar de secagem em 2 °C.



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2000)

Com base nesses dados, o primeiro passo deve ser a determinação da vazão do ar de secagem, expressa por $(Q) = \text{fluxo de ar (m}^3/\text{min.t)} \times \text{Mu (t)}$, onde $\text{Mu} = \text{massa específica do produto (t/m}^3) \times \text{volume de grãos dentro do silo (m}^3) = 0,685 \text{ t/m}^3 \times 0,36 \text{ m}^3 = 0,25 \text{ t}$. Assim, $Q = 10 \text{ m}^3/\text{min.t} \times 0,25 \text{ t} = 2,5 \text{ m}^3/\text{min}$.

A determinação das propriedades psicrométricas do ar foi feita com o auxílio do gráfico psicrométrico exibido na Figura 3.5, tendo como base o ponto de estado, representado no gráfico por um círculo azul, determinado pela temperatura do ar de secagem, $T_a = T + T_{\text{vent}} + T_{\text{aquec}} = 17 \text{ }^\circ\text{C} + 1 \text{ }^\circ\text{C} + 2 \text{ }^\circ\text{C} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ e sua umidade relativa (65%).

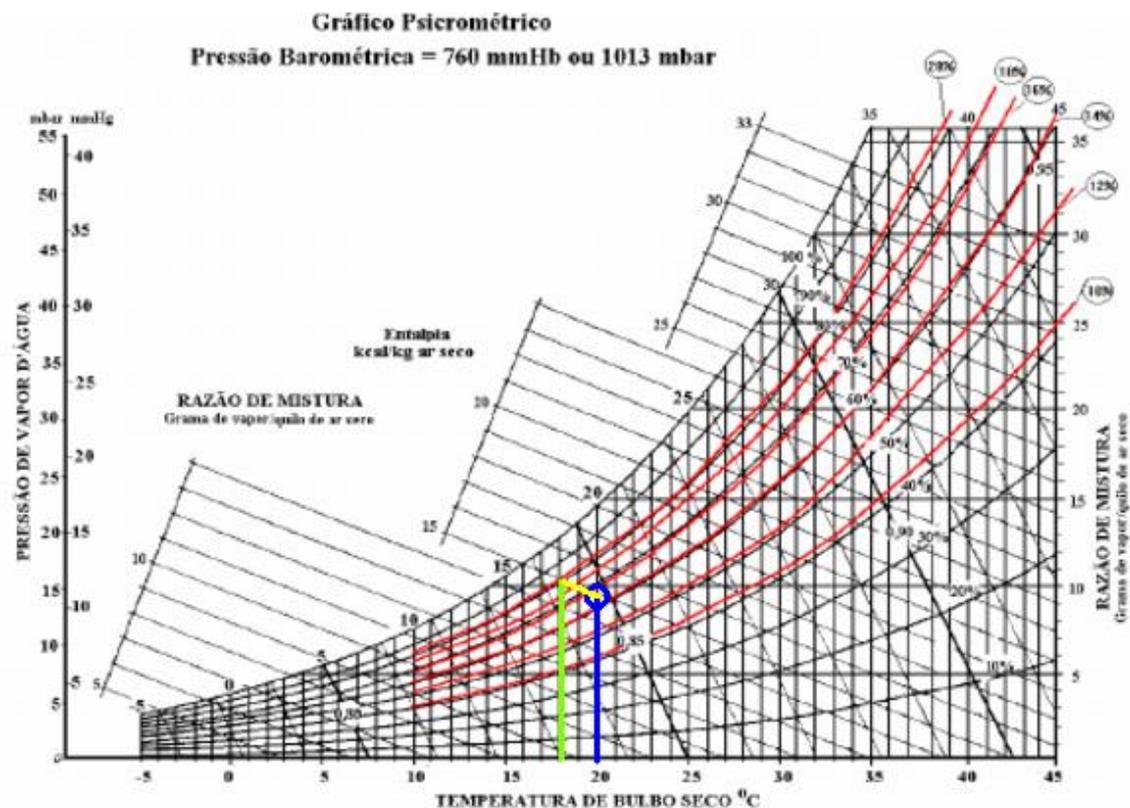


Figura 3.5 - Gráfico psicrométrico com curvas de U_e para o milho e determinação das propriedades psicrométricas do ar de secagem

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2000)

Pelo gráfico apresentado Figura 3.5, obteve-se, por meio de uma interpolação visual, o volume específico (v) de $0,843 \text{ m}^3/\text{kg}$. Para se obter a temperatura de equilíbrio, traçou-se uma reta (amarela) paralela às linhas de entalpia, partindo do ponto de estado até o encontro com a curva (vermelha) que representa a umidade de 20% b.u. A partir desta intersecção, traçou-se uma reta vertical, representada pela cor verde, até que esta tocasse o eixo da temperatura de bulbo seco, onde leu-se a temperatura de $18 \text{ }^\circ\text{C}$.

O teor de umidade de equilíbrio, para $52\% < UR < 100\%$ é dado por $U_e = 21,2198 \exp(0,0146 \times UR) / [\ln(9 \times T / 5 + 32)]$. Como $UR = 65\%$ e $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, tem-se que $U_e = 12,99\%$ b.u.

Transformando a umidade inicial do milho (U_i) e a umidade de equilíbrio para b.s. através de $U' = [U / (100 - U)] \times 100$, onde U' é a umidade em b.s. e U é a umidade em b.u., tem-se que $U_i = 0,25 \text{ b.s.}$ e $U_e = 0,15 \text{ b.s.}$ Assim, $U_{\text{emédio}} = (U_e + U_i) / 2 = 0,20 \text{ b.s.}$

O calor latente de vaporização é dado por $h_v = (A - 0,57 \times T) \times [1 + B \times \exp(-C \times U_{\text{emédio}})]$, onde $A = 606,00$; $B = 4,35$ e $C = 28,25$ de acordo com Silva et al. (2000). Portanto, $h_v = 603,70$ kcal/kg.

A quantidade de matéria seca é definida por $MS = (1 - \text{teor de umidade b.u., em decimal}) \times Mu = (1 - 0,2) \times 0,25 = 0,2$ t, que equivale a 200 kg.

Assim, de posse das variáveis necessárias, o tempo de secagem foi calculado a partir da equação 2 a seguir:

$$60 \times (Q/v) \times C_a \times (T_a - T_e) \times t = h_v \times MS \times (U_i - U_e) \quad (2)$$

em que,

Q = vazão do ar de secagem (m^3/min);

V = volume específico do ar de secagem (m^3/kg ar seco);

C_a = calor específico do ar ($\text{cal}/\text{g}^\circ\text{C}$);

T_a = temperatura do ar de secagem ($^\circ\text{C}$);

T_e = temperatura de equilíbrio ($^\circ\text{C}$);

t = tempo de secagem (h);

h_v = calor latente de vaporização (kcal/kg de água);

MS = matéria seca existente no produto (kg);

U_i = umidade inicial (decimal, b.s.);

U_e = umidade de equilíbrio (decimal, b.s.).

Isolando t na equação 2, e resolvendo-a, temos que o tempo gasto para a secagem é de 141,36 horas, correspondente a 5,89 dias.

Por fim, calculou-se as energias térmica e elétrica necessárias ao processo. No presente caso, considerando-se a cidade de Ouro Preto, obteve-se a temperatura do ar de secagem de 20°C , apenas 3°C acima da temperatura ambiente. Como dito anteriormente, o sistema será projetado para capacidade máxima, levando em conta as condições mais desfavoráveis. Assim, para os cálculos do dimensionamento, considerou-se que o ar de secagem foi aquecido 10°C acima da temperatura ambiente, limite para um sistema de secagem a baixa temperatura.

A potência térmica pode ser determinada conforme a equação (3).

$$P = \dot{M} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (3)$$

onde,

P = potência térmica [W];

\dot{M} = vazão mássica [kg/s];

C_p = calor específico médio do ar [J/kg.K];

$\Delta T = (T_{\text{saidadoaquecedor}} - T_{\text{entradadoaquecedor}})$ [K].

A vazão mássica pode ser calculada multiplicando-se a vazão volumétrica pela massa específica do fluido. Considerando a massa específica do ar como 1,2 kg/m³ e tendo que a vazão volumétrica é de 2,5 m³/min, a vazão mássica é 3 kg/min, ou seja, 0,05 kg/s. O calor específico médio do ar é 1004,8 J/kg.K. Assim,

$$P = 0,05 \times 1004,8 \times 10 = 502,4 \text{ W}$$

Portanto, a potência térmica necessária para aquecer o ar de secagem é de 502,4 W.

Já para o cálculo da potência elétrica para ventilação, primeiro calculou-se a densidade do fluxo de ar, dada por

$$DFA = Q / A$$

em que,

DFA = densidade do fluxo de ar [m³/min.m²];

Q = vazão do ar [m³/min];

A = área do silo [m²].

Calculando a área do silo através de $A = \pi d^2/4$, onde $d = 0,57$ m, tem-se que $A = 0,25$ m². Portanto,

$$DFA = 2,5 / 0,25 = 10 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$$

A partir da DFA encontrada, obteve-se a pressão estática ΔP de 40 mmca/m, por meio do gráfico de Shedd apresentado na Figura 3.6.

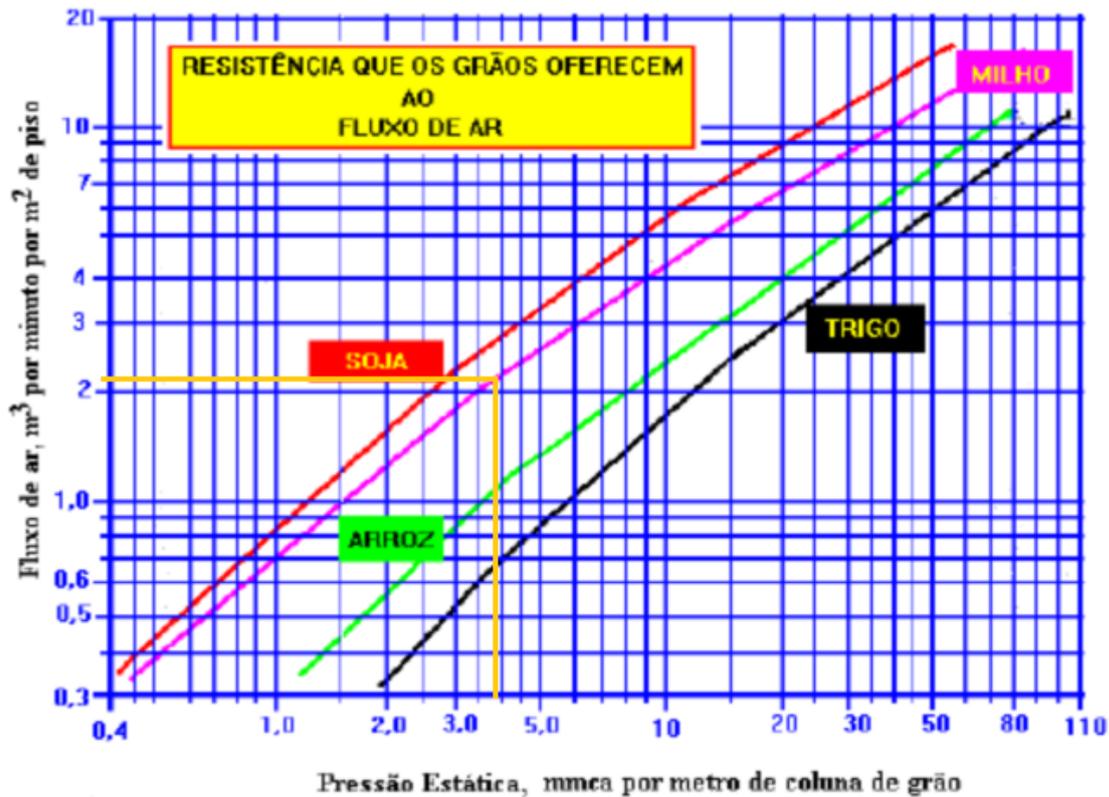


Figura 3.6 - Gráfico de Shedd

Fonte: Braz (2017)

O próximo passo é o cálculo da diferença de pressão do ventilador, dada por

$$\Delta p = \Delta P \times h \times F_e$$

em que,

Δp = diferença de pressão do ventilador [mmca];

ΔP = pressão estática [mmca/m];

h = altura do silo [m];

F_e = fator esperado de eficiência do sistema.

No que diz respeito às perdas do sistema, a perda de carga deve ser calculada em toda parte do secador em que o ar percorre. Na prática, segundo Milman (2002), considera-se que a perda de carga total é de aproximadamente 30%. Desse modo, considerando o sistema com eficiência de 70%, o fator F_e é de 1,3.

Logo,

$$\Delta p = 40 \times 1,66 \times 1,3 = 86,32 \text{ mmca, equivalente a } 846,49 \text{ Pa.}$$

Por fim, a potência do ventilador é calculada com o auxílio da equação (4).

$$P_{el} = \frac{\dot{Q} \cdot \Delta p}{\eta} \quad (4)$$

onde,

P_{el} = potência elétrica [W]

\dot{Q} = vazão mássica [m³/s]

Δp = diferença de pressão ($p_{entrada}$ - p_{saida}) do ventilador [Pa]

η = rendimento do conjunto motor ventilador [adimensional]

Considerando o rendimento do conjunto motor ventilador como 75%, tem-se que

$$P_{el} = 0,04 \times 846,49 / 0,75 = 45,15 \text{ W}$$

Assim, a potência elétrica necessária à ventilação é de 45,15 W.

4 PROJETO DO SISTEMA SOLAR COMO FONTE DE ENERGIA PARA SECAGEM DE GRÃOS

Este capítulo apresenta o dimensionamento do sistema solar proposto, que visa fornecer energia elétrica e ar aquecido ao processo de secagem de grãos, utilizando energia térmica e fotovoltaica.

O sistema será composto por um coletor solar, responsável pelo aquecimento do ar de secagem; uma placa fotovoltaica para a captação da energia solar; baterias, que armazenam energia quando esta não estiver sendo usada diretamente; um controlador de carga, que controla o uso da energia fotovoltaica à carga das baterias, protegendo-as de descargas e sobrecargas excessivas; e por fim, um inversor de potência, que transforma a corrente contínua gerada em corrente alternada, possibilitando sua utilização.

4.1 Projeto do sistema de aquecimento do ar

Para determinar a área do coletor necessária, de forma a obter o devido aquecimento do ar, utilizou-se a fórmula:

$$S = \frac{P}{\eta \times E_c}$$

onde,

S = área do coletor [m²];

P = potência térmica [W];

η = rendimento do painel [adimensional];

E_c = irradiância do sol na região [W/m²].

Segundo Tiba e Reis (2016), a média anual de radiação solar global em Ouro Preto é de 4,7 kWh/m².dia. Assim,

$$E_c = (4,7 \times 1000 \times 60) / (24 \times 60) = 195,83 \text{ W/m}^2$$

De acordo com Transsen (2012), o rendimento de um coletor solar do tipo considerado é de 79,1%.

Logo,

$$S = 502,4 / (0,791 \times 195,83) = 3,2 \text{ m}^2$$

Portanto, deve-se utilizar dois coletores solares de 2 m² cada.

Sua instalação deve ser feita conforme a Figura 4.1, de modo que o coletor esteja voltado para o norte geográfico, para que no inverno, ponto crítico de funcionamento do sistema solar, a irradiação solar possa ser melhor aproveitada.

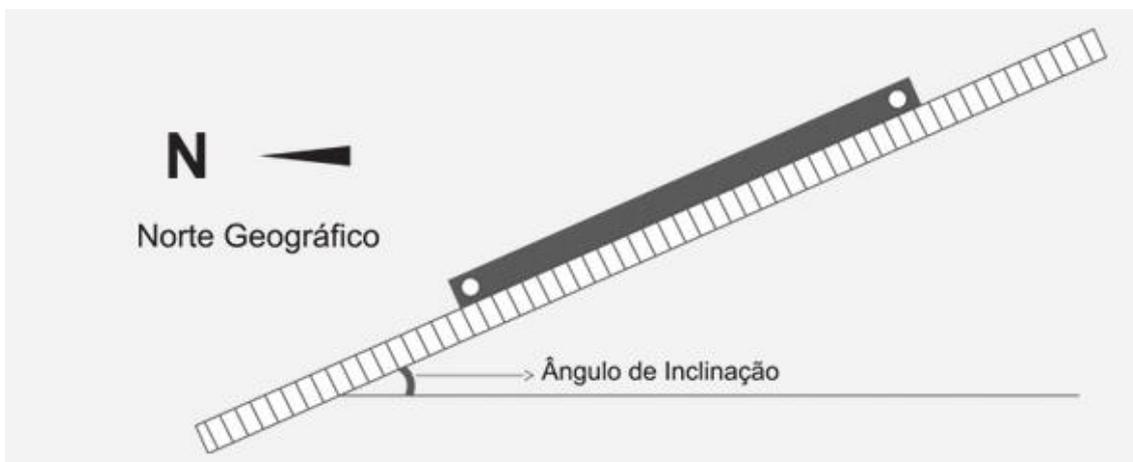


Figura 4.1 - Instalação de um coletor solar

Fonte: Kisoltec Aquecedor Solar (2017)

O ângulo de inclinação recomendável é definido como a latitude da região onde o coletor será instalado acrescida de 10 °C. Como a latitude de Ouro Preto é de 20°, o ângulo de inclinação deve ser 30°.

4.2 Projeto do sistema fotovoltaico

Para o dimensionamento do painel fotovoltaico, primeiro deve ser definido se o sistema de ventilação é de uso contínuo. Segundo Silva et al. (2000), o ventilador deve permanecer ligado enquanto o teor de umidade dos grãos for acima de 16% b.u. Quando o teor de umidade for inferior a 16% b.u. e a umidade relativa do ar for superior a 75%, o ventilador deverá permanecer ligado apenas no período diurno. Caso contrário, se a umidade relativa for inferior a 75%, o ventilador deve permanecer ligado até o término do processo.

Como foi citado anteriormente, quando a umidade do milho se torna inferior a 16% b.u., a umidade relativa do ar é de 75%. Portanto, o ventilador deve permanecer ligado até o final da secagem, resultando em um consumo de 45,15 W x 141,36 h = 6382,40 Wh.

Dividindo o consumo do processo (6382,40 Wh) pela sua duração em dias (5,89), tem-se que o consumo diário é de 1083,6 Wh/dia.

Considerando o índice solarimétrico 4,7 kWh/m².dia, calculou-se a potência necessária as placas P_{fot} :

$$P_{\text{fot}} = 1083,6 / 4,7 = 230,55 \text{ W}$$

A eficiência padrão de um projeto fotovoltaico é de 83%, devido às perdas na geração e transmissão de potência. Assumindo a eficiência:

$$P_{\text{fot}} = 230,55 / 0,83 = 277,77 \text{ W}$$

Portanto, o painel fotovoltaico deve produzir uma potência de 300 W. Considerando que o sistema opera a 24 V, deve-se então associar as placas fotovoltaicas de 12 V em série. Sendo assim, deve-se utilizar duas placas solares fotovoltaicas de 150 W cada.

No que diz respeito ao controlador de carga, sua capacidade deve superar a corrente dos painéis. Como o sistema funciona em 24 V, calcula-se a corrente por:

$$I_c = P / V = 300 / 24 = 12,5 \text{ A}$$

Assim, deve-se utilizar um controlador de 15 A.

No projeto do banco de baterias, recomenda-se utilizar baterias que operam com 50% de profundidade de descarga, que proporcionam aumento de sua vida útil em até duas vezes. Para o cálculo da bateria, deve-se multiplicar a corrente produzida pela placa pelas horas de insolação diária. Segundo Tiba (2000), a média anual de insolação diária em Ouro Preto é de 6 horas. Assim,

$$12,5 \text{ A} \times 6 \text{ h} = 75 \text{ Ah}$$

Entretanto, esse valor é correspondente à uma bateria ideal, que não existe na prática. Como optou-se por descarga de 50%,

$$75 \text{ Ah} / 0,5 = 150 \text{ Ah}$$

A autonomia do sistema está diretamente relacionada com o número de baterias. Quanto maior o número de baterias, maior será a autonomia. Dessa forma, deve-se usar 2 baterias de 75 Ah/12 V. Como as baterias são para 12 V, deve-se então associá-las em série para obter a tensão de 24 V.

Para o projeto do inversor, é recomendado que sua potência esteja 10% acima da potência de pico do sistema, que é obtida dividindo-se o consumo diário pela média de insolação diária:

$$P_p = 1083,6 / 6 = 180,6 \text{ W}$$

Logo,

$$P_i = P_p + 10\% = 180,6 + 18,06 = 198,66 \text{ W}$$

Portanto, deve-se utilizar um inversor de 200W.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos dados obtidos ao longo deste trabalho, foram calculadas, conforme descrito anteriormente e utilizando o software Excel, as variáveis necessárias para o dimensionamento dos equipamentos do sistema solar de um secador de grãos cujo silo possui diâmetro de até 7 m, sendo incrementado de 0,5 m em 0,5 m. Para simplificação a simulação considera uma relação fixa de altura = 2,5 x diâmetro.

A Tabela 5.1 mostra os dados usados nos cálculos, e a Tabela 5.2 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 5.1 - Dados base para os cálculos

Material	Relação alt/diam [adim]	m _{esp_} grão [t/m ³]	Dif. Temp. [K]	vazão _{esp_} ar [m ³ /min. m ²]	Dp [mm CA/m]	Fe [adim]	Rendimento Ventilador [%]	Rendimento Geração + Transmissão [%]	Tensão Bateria CC [V]	C _{par} [J/kg.K]	m _{esp_ar} [kg/m ³]	Rad. solar média/ dia OP [W/m ²]	Média de horas sol/dia OP [h]	Rendimento Coletor [adim]
Milho	2,5	0,686	10	10	40	1,3	75	83	24	1004,8	1,2	4700	6	0,791

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 5.2 - Resultados obtidos

Diâmetro [m]	Altura útil [m]	Volume [m ³]	Área [m ²]	Capacidade [t]	Perda de carga [Pa]	Pel,vent [W]	Consumo diário vent [W.h]	pot. placas fotovolta. [W]	Control. carga [A]	Cap. Bat. [A.h]	Inversor [W]	Vaz.mass ar [kg/s]	Pot. Térm [W]	Pot med incidida/dia [W/m ²]	Área de coletor Térmico m ²
0,5	1,25	0,245	0,196	0,168	637	27,8	667	171	7,1	86	122,4	0,0393	395	195,83	2,55
1	2,5	1,963	0,785	1,347	1275	222,5	5340	1369	57,0	684	979,0	0,1571	1578	195,83	10,19
1,5	3,75	6,627	1,767	4,546	1912	750,9	18022	4620	192,5	2310	3304,1	0,3534	3551	195,83	22,93
2	5	15,708	3,142	10,776	2550	1780,0	42720	10951	456,3	5476	7832,0	0,6283	6313	195,83	40,76
2,5	6,25	30,680	4,909	21,046	3187	3476,6	83437	21389	891,2	10694	15296,9	0,9817	9865	195,83	63,68
3	7,5	53,014	7,069	36,368	3824	6007,5	144180	36960	1540,0	18480	26433,0	1,4137	14205	195,83	91,70
3,5	8,75	84,185	9,621	57,751	4462	9539,7	228952	58691	2445,4	29345	41974,6	1,9242	19335	195,83	124,82
4	10	125,664	12,566	86,205	5099	14240,0	341760	87608	3650,3	43804	62655,9	2,5133	25253	195,83	163,03
4,5	11,25	178,924	15,904	122,742	5737	20275,3	486607	124739	5197,5	62370	89211,3	3,1809	31961	195,83	206,33
5	12,5	245,437	19,635	168,370	6374	27812,5	667499	171110	7129,6	85555	122374,8	3,9270	39458	195,83	254,73
5,5	13,75	326,677	23,758	224,100	7012	37018,4	888441	227747	9489,5	113874	162880,9	4,7517	47745	195,83	308,22
6	15	424,115	28,274	290,943	7649	48059,9	1153438	295678	12319,9	147839	211463,7	5,6549	56820	195,83	366,81
6,5	16,25	539,225	33,183	369,908	8286	61104,0	1466496	375928	15663,7	187964	268857,5	6,6366	66685	195,83	430,49
7	17,5	673,479	38,485	462,007	8924	76317,4	1831618	469525	19563,5	234763	335796,6	7,6969	77338	195,83	499,27

Fonte: Elaborado pela autora

Com base nos resultados encontrados, foram traçados gráficos, apresentados nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5, relacionando a capacidade do silo com os equipamentos a serem dimensionados: coletor solar, placa fotovoltaica, controlador de carga, banco de baterias e inversor.

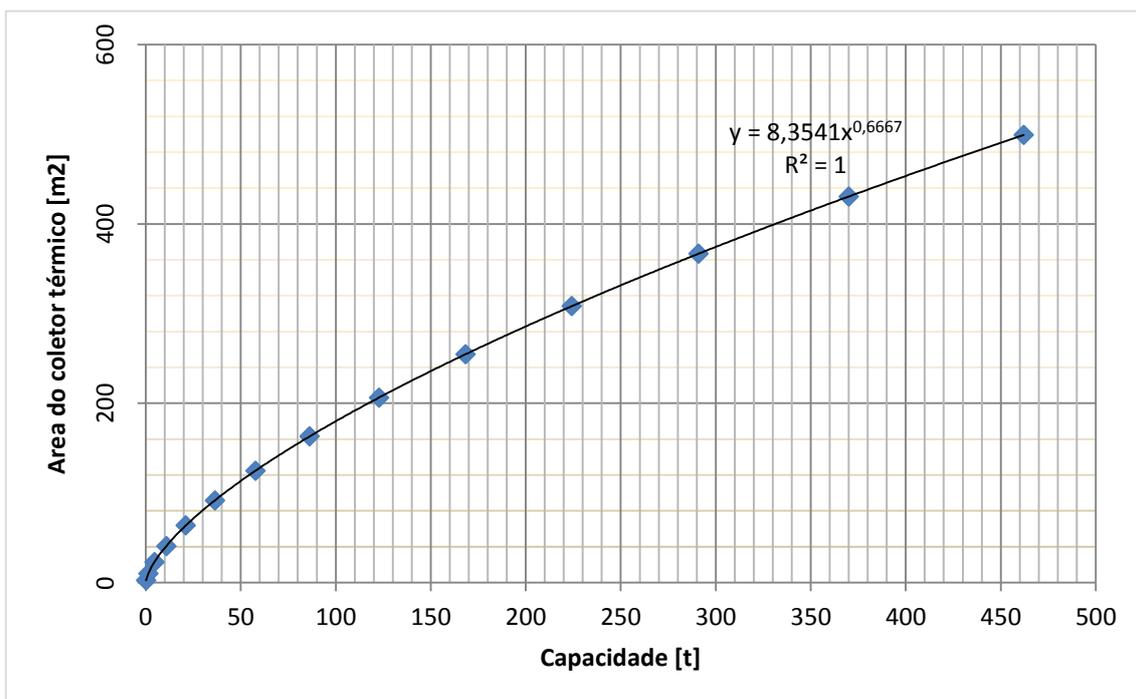


Figura 5.1 - Gráfico capacidade [t] x área do coletor térmico [m²]

Fonte: Elaborado pela autora

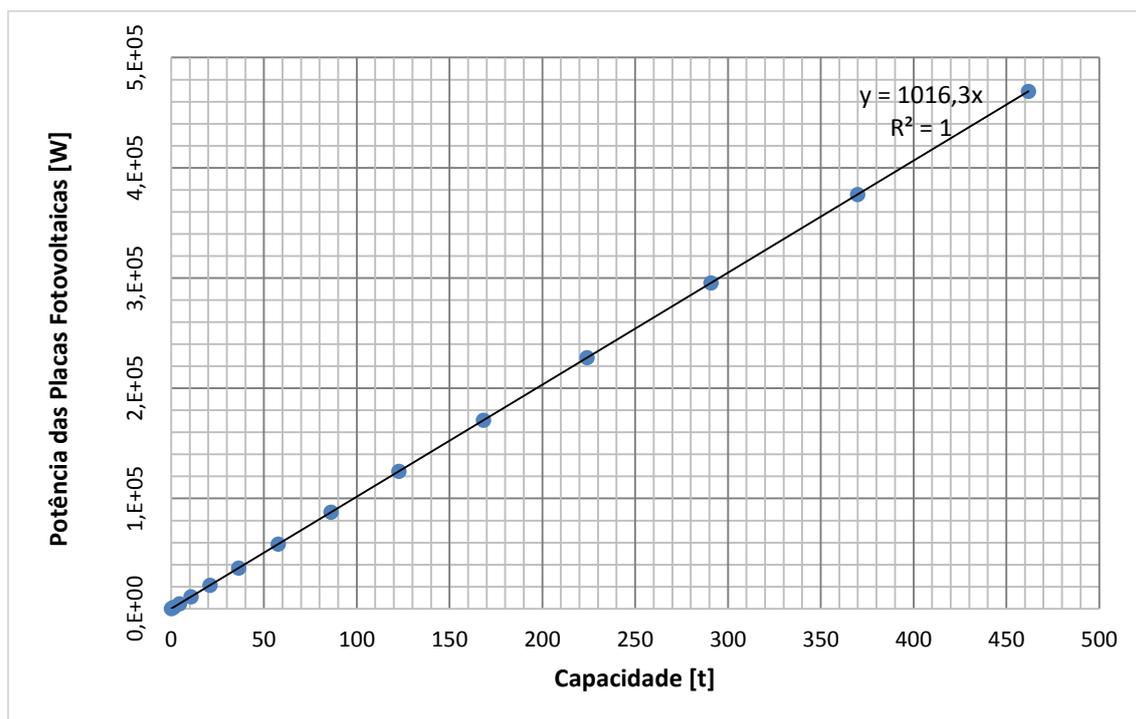


Figura 5.2 - Gráfico capacidade [t] x potência das placas fotovoltaicas [W]

Fonte: Elaborado pela autora

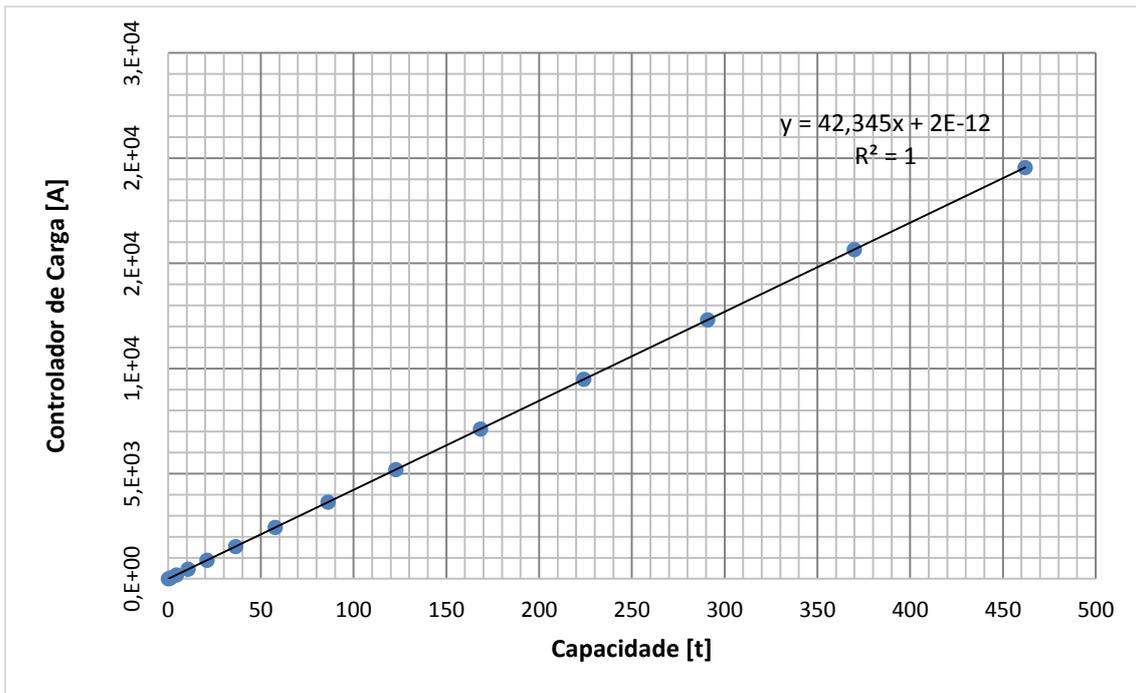


Figura 5.3 - Gráfico capacidade [t] x controlador de carga [A]

Fonte: Elaborado pela autora

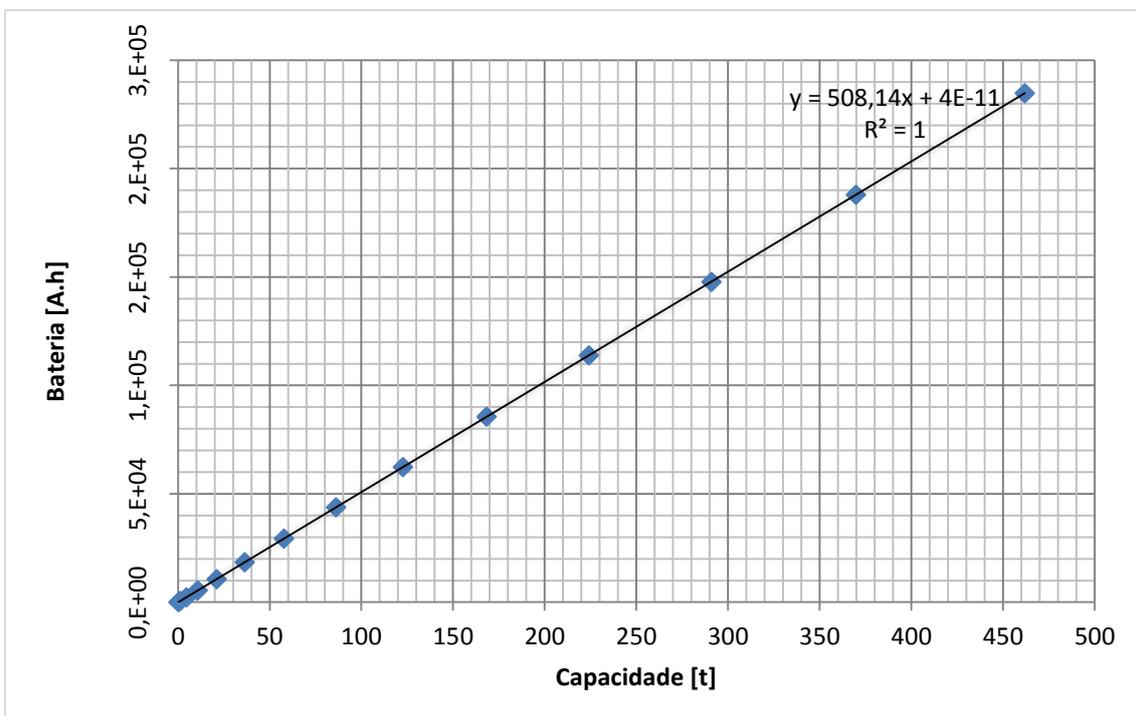


Figura 5.4 - Gráfico capacidade [t] x bateria [A.h]

Fonte: Elaborado pela autora

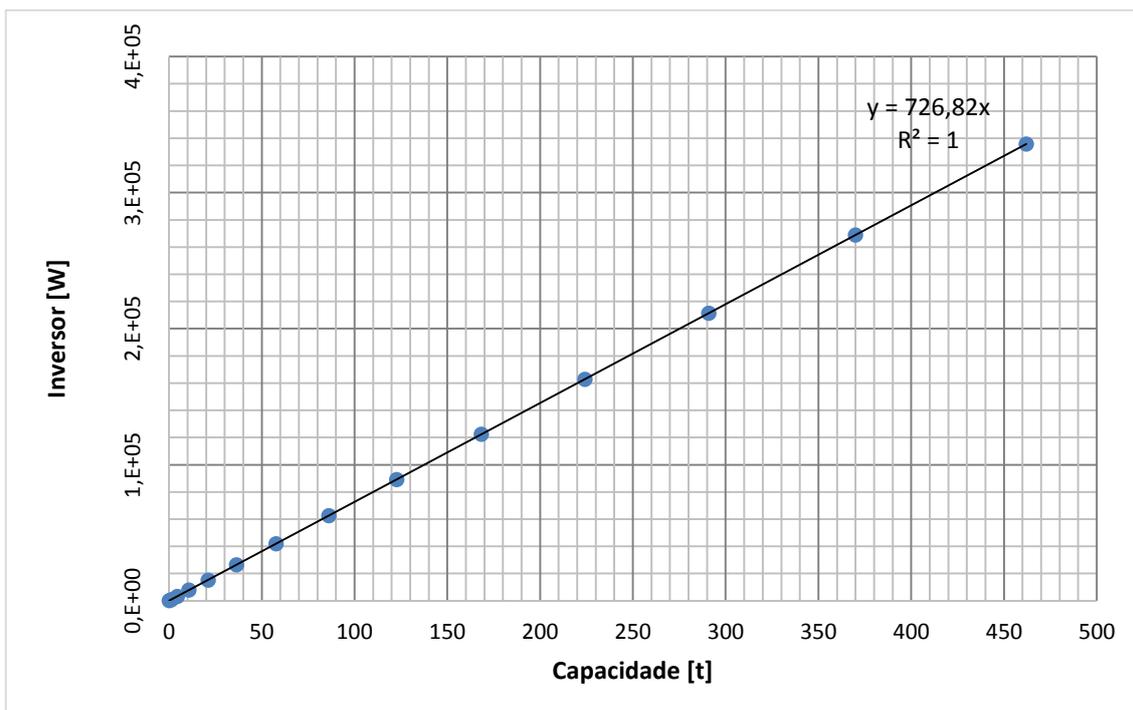


Figura 5.5 - Gráfico capacidade [t] x inversor [W]

Fonte: Elaborado pela autora

Como observa-se nos gráficos, à medida em que a capacidade do silo aumenta, também aumentam a área do coletor solar, a potência das placas fotovoltaicas, a armazenagem das baterias, a corrente do controlador de carga e a potência do inversor necessárias para a realização processo de secagem.

Conforme o gráfico da Figura 5.1, pode-se observar que à medida em que a capacidade aumenta, a área do coletor térmico pode variar mais do que a variação da capacidade do silo.

Já os gráficos das Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 mostram que a potência das placas fotovoltaicas, a armazenagem das baterias, a corrente do controlador de carga e a potência do inversor variam linearmente com o aumento da capacidade do silo, ou seja, são diretamente proporcionais.

Para a avaliação da viabilidade de implantação do sistema solar em um secador de grãos, estipulou-se como 10 anos o prazo para análise de retorno do investimento e então estimou-se o investimento da implantação. A Tabela 5.3 apresenta a relação dos equipamentos utilizados e seus custos. O preço dos equipamentos básicos exibido na tabela é uma média dos valores encontrados no mercado. Os acessórios necessários à instalação são: cabos, disjuntores, conectores e sistema de fixação, e seu preço foi obtido

por meio de uma interpolação dos dados retirados de ABINEE (2012). O custo de instalação é de 25% do investimento total.

Tabela 5.3 - Relação de equipamentos e custos para implantação do sistema solar na secagem de grãos

Item	Preço por Unidade	Quantidade	Valor Total
Coletor Solar 2,0x1,0 m	R\$ 759,90	2	R\$ 1.519,80
Placa Fotovoltaica 150 W	R\$ 500,00	2	R\$ 1.000,00
Bateria 75 Ah	R\$ 350,00	2	R\$ 700,00
Controlador 15 A	R\$ 70,00	1	R\$ 70,00
Inversor 200 W	R\$ 150,00	1	R\$ 150,00
Acessórios	-	-	R\$ 3.742,33
Custo Instalação	-	-	R\$ 1.795,53
		Investimento Total	R\$ 8.977,66

Fonte: Elaborado pela autora

Calculando a produção energética durante os 10 anos, tem-se que:

$$P_{\text{produzida}} = (1083,6 \text{ Wh/dia} \times 365 \text{ dias} \times 10 \text{ anos}) = 3955,14 \text{ kWh}$$

Dessa forma, obteve-se o custo de cada kWh produzido pelo sistema solar dividindo o investimento de R\$ 8977,66 pela potência produzida, 3955,14 kWh, resultando em R\$ 2,27/kWh.

De acordo com a CEMIG (2017), a tarifa de energia elétrica, sem impostos, de 1 kWh é de R\$ 0,34051. Considerando o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços (ICMS), cuja alíquota é de 30%, a tarifa se torna R\$ 0,442663. Assim, em 10 anos, seriam pagos R\$ 1750,79 à concessionária.

Verificou-se então o investimento a longo prazo, tendo como base a vida útil das placas fotovoltaicas (30 anos). Como a vida útil dos inversores é de aproximadamente 10 anos, durante o período em análise serão necessários três deles, resultando em um investimento final de R\$ 9277,66. A potência produzida será de 11865,42 kWh, o que faz com que o preço de cada kWh seja de R\$ 0,78. Em contrapartida, se fosse utilizada a energia elétrica fornecida pela CEMIG, seriam gastos R\$ 5252,38.

A Figura 5.6 ilustra a comparação entre os gastos do investimento para o uso do sistema solar e os gastos da utilização da energia da concessionária, para períodos de 10 e 30 anos.

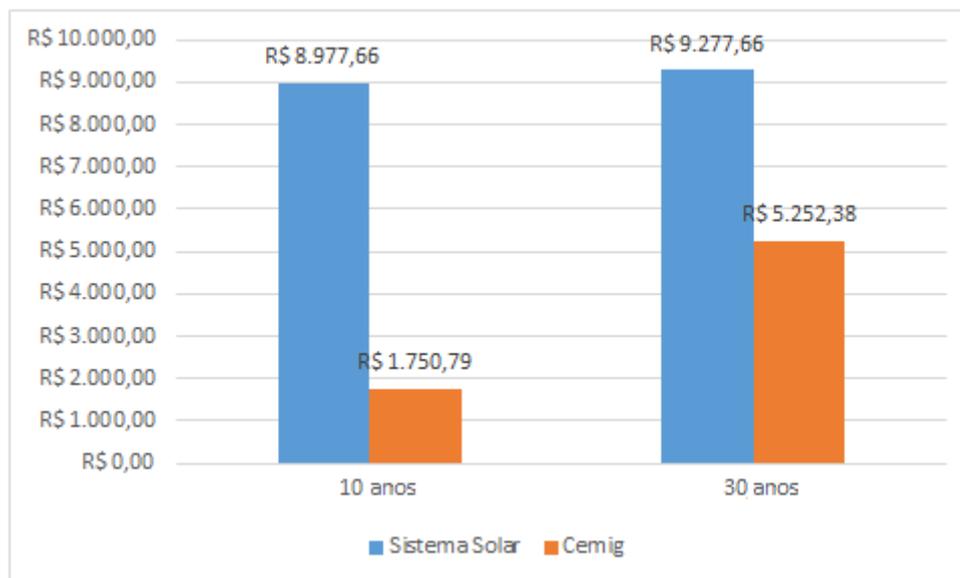


Figura 5.6 - Gráfico gastos totais

Fonte: Elaborado pela autora

Portanto, pode-se concluir que, para um período de até 30 anos, a implantação do sistema solar na secagem de grãos nas condições consideradas não é viável, já que o valor de cada kWh produzido é superior à tarifa cobrada pela concessionária (CEMIG).

A análise de viabilidade poderia ser realizada para um período de investimento maior, adicionando ao custo total o gasto referente às trocas das placas fotovoltaicas. Porém, considerando que a maioria dos produtores de milho são agricultores familiares, o longo tempo de retorno do investimento pode tornar o sistema inviável.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar o uso de energias renováveis no processo de secagem de grãos.

Para o cálculo do tempo de secagem de 270 kg de grãos de milho, considerou-se as propriedades do ar da cidade de Ouro Preto. As condições do ar de secagem encontradas não oneram a instalação, já que o sistema solar foi dimensionado para atender as condições consideradas mais desfavoráveis.

A partir do dimensionamento, calculou-se o investimento necessário para a implantação do sistema, e então verificou-se sua viabilidade.

Com base nos resultados encontrados, pode-se concluir que o sistema não é viável economicamente, considerando o prazo de investimento como 30 anos, equivalente à vida útil da placa fotovoltaica.

O cálculo de viabilidade do sistema não foi realizado para um prazo de investimento maior, uma vez que a maior parte da produção de milho é realizada por agricultores familiares, que na maioria das vezes possuem condições econômicas desfavoráveis, e conseqüentemente, não possuem tamanho prazo para retorno do investimento. Entretanto, a utilização do sistema é útil em locais onde não há disponibilidade de rede elétrica.

Constata-se então, que embora seja recomendado o uso de energias renováveis, esta opção pode não ser a mais viável quando se trata de produção em pequena escala.

Como sugestões para pesquisas futuras, recomenda-se avaliar a utilização do sistema solar proposto no processo de aeração de grãos e de um sistema de armazenamento de calor de forma a prolongar o aquecimento durante os períodos sem insolação, além da implementação do controle de umidade e de temperatura para evitar uma possível deterioração dos grãos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINEE. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. ABINEE, 2012.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005.

ANEEL. **Resolução Normativa N°482**, 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2017.

BAUDET, L.; VILLELA, F. A. Armazenamento Garantindo o Futuro. **SEED NEWS PELOTAS**, Pelotas, v. 4, n. 4, p. 28-32, 2000.

BONILLA, A. A. C. Medição de Temperatura - **Sistemas de Medição - UDESC**. Disponível em: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/bonilla/materiais/Cap_9_Temperatura_ale.pdf>. Acesso em: 18 jul. 017

BRAZ, M. R. S. Movimento de Ar – **Pré Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas – UFRRJ**. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/20732304/aula-7-movimento-de-ar>>. Acesso em: 07 ago. 2017.

BROOKER, D. B.; BAKKER ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying Cereal Grains**. Westport, Connecticut: The Avi Publishing Company, Inc. 1974.

Cabo Sensor de Temperatura. **Widitec**. 2016. Disponível em: <<http://www.widitec.com.br/novo/produtos/detalhes/61/cabo%20sensor%20de%20temperatura>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

CEMIG. **Alternativas Energéticas: uma visão CEMIG**. Belo Horizonte: CEMIG, 2012.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos - Safra 2015/2016**. v. 3, n. 4. Brasília: CONAB, 2016.

CONAB. **Acompanhamento safra brasileira de grãos - Safra 2016/2017**. v. 4, n. 9. Brasília: CONAB, 2017

COSTA, A. R. S. **Sistema de Secagem Solar para Frutos Tropicais e Modelagem da Secagem de Banana em um Secador de Coluna Estática**. 2008. 169f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

CRESESB. **Energia Solar: princípios e aplicações**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2006.

EMBRAPA. **Colheita e pós-colheita: Secagem e Armazenamento**. 2011. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_7_ed/colsecagem.html>. Acesso em: 10 ago. 2017.

EMBRAPA. **Produção de Milho na Agricultura Familiar**. 2011. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/905143/1/circ159.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2016: Ano Base 2015**. Rio de Janeiro: EPE, 2016

FAO/INCRA. **Diretrizes de política agrária e desenvolvimento sustentável**. Brasília, 1995

GARCIA, T. S. **Avaliação do desempenho energético de uma edificação residencial eficiente**. 2013. 127 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Trabalho Final de Curso em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2014.

HIH-4000 Series - Humidity Sensors. **Honeywell**. Disponível em: <<http://www.mouser.com/ds/2/187/honeywell-sensing-hih4000%20series-product-sheet-009-947374.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

IBGE. **Indicadores IBGE: Estatística da Produção Agrícola - fevereiro de 2017**. 2017. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Fasciculo_Indicadores_IBGE/estProdAgr_2017_02.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2017.

Informações Gerais. **Ouro Preto Prefeitura**. Disponível em: <<http://www.ouropreto.mg.gov.br/informacoes-gerais>>. Acesso em: 01 jul. 2017.

LIANG, D.; MONTEIRO, L. F.; TEIXEIRA, M. R.; MONTEIRO, M. L. F.; COLLARES PEREIRA, M. Fiber optic solar energy transmission and concentration. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. v. 54, n. 1, p. 323-331, 1998.

Manual aquecedor solar – Magnum. **Transsen Aquecedor Solar**. 2012. Disponível em: <http://www.transsen.com.br/wp-content/themes/transsen-DEV/images/produtos/manual/Manua_Banho.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2017

Manual de Instalação do Aquecedor Solar. **Kisoltec Aquecedor Solar**. 2017. Disponível em: <<http://kisoltec.com.br/instalacao-aquecedor-solar>>. Acesso em: 17 ago. 2017.

Mapas do Boletim Agroclimatológico - Umidade Relativa do Ar Média (%). **Instituto Nacional de Meteorologia**. 2017. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/portal_antigo/agrometeorologia/boletim_agro/mapas.php>. Acesso em: 05 ago. 2017.

MARTINI, R.E.; PRICHOA, V.P.; MENEGAT, C.R. Vantagens e desvantagens da implantação de silo de armazenagem de grãos na granja De Martini. **Revista de Administração e Ciências Contábeis do IDEAU**, Uruguai, v. 4, n. 8, p. 1-17, 2009.

MARTINS, J.G.M. **Sistemas de Aproveitamento de Energia Solar Térmica na SOLution**. 2009. 106 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Industrial e Gestão) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, Porto, 2009.

MARTINS, R. R.; FRANCO, J. B. R.; OLIVEIRA, P. A. V. **Tecnologia de Secagem de Grãos**. Passo Fundo: Embrapa Trigo / EMATER/RS, 1999.

MARTINS, R. R.; FRANCO, J. B. R.; OLIVEIRA, P. A. V.; GOMES, J. F. S.; FRANZOZI, C. D. P. Secador de grãos com uso de energia solar. **Revista Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, Porto Alegre, v. 3, n. 1, p. 29-35. 2002.

Medidor de Vazão para Gases - Modelo MTG Roscado. **Dwyler**. Disponível em: <<http://catalogo.dwyler.com.br/viewitems/medidor-de-vazao-para-gases-modelo-mtg/medidor-de-vazao-para-gases-modelo-mtg-roscado>>. Acesso em: 13 fev. 2017.

MILMAN, M. J. **Equipamentos para pré-processamento de grãos**. Pelotas: Ed. Universitária/UFPel, 2002.

MONTEIRO, P. M. B. **Tecnologia 1-Wire™ Aplicada ao Controle em Tempo Real em Sistemas de Aeração de Grãos**. 2002. 153 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2002.

MORABITO, R; IANNONI, A. P. **Logística Agroindustrial**. In: BATALHA, O. **Gestão Agroindustrial**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

MORAES JUNIOR, L. T. R. **Recuperação Energética de Resíduos no Médio Vale do Itajaí com Ênfase na Conversão em Energia Elétrica**. 2012. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2012.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006.

Secador de Leito Fixo. **Polidryer Indústria e Comércio de Máquinas**. Disponível em: <<http://www.polidryer.com.br/secador-leito-fixo>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

Sensor de Nível Modelo: SN-PROG - 24 VCC - AT. **Microhard Sensores Industriais**. Disponível em: <<http://www.sensores-microhard.com.br/produtos.html>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

SILVA, E. S.; OLIVEIRA, J.; MACHADO, A. V.; COSTA, R. O. Secagem de Grãos e Frutas: Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, Garanhuns, v. 5, n. 1, p. 19-23. 2015.

SILVA, J. S.; BERBET, P. A.; AFONSO, A. D. L.; LACERDA FILHO, A. F. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000.

Subida, A. **Manual de energia solar fotovoltaica**. Viseu: ADIV, 2015.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações**. 8. ed. São Paulo: Érica, 2011. 224 p.

TIBA, C. **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos**. Recife: Ed. Universitária UFPE, 2000.

TIBA, C.; REIS, R. J. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais – Volume II**. Belo Horizonte: Futura Express, 2016.

Valores de Tarifas e Serviços. **Companhia Energética de Minas Gerais**. 2017. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx>. Acesso em: 15 ago. 2017.

VANNI, S.R. **Estudo de viabilidade econômica de fontes alternativas de energia de uma comunidade típica da região nordeste do Brasil**. 2008. 164 f. Dissertação (Mestre em Ciências) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2008.

Ventiladores Siroco VSE. **Aeromack**. Disponível em: <<http://www.aeromack.com.br/ventiladores-siroco-vse.php>>. Acesso em: 25 jul. 2017.