



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

BRUNO DE ALENCAR CARNEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA EXPERIMENTAL DE SECAGEM COM
RODA DESSECANTE E AQUECIMENTO POR ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

FORTALEZA

2019

BRUNO DE ALENCAR CARNEIRO

DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA EXPERIMENTAL DE SECAGEM COM
RODA DESSECANTE E AQUECIMENTO POR ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Dissertação submetida à Coordenação do
Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do
Ceará, como requisito para obtenção do
grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Profa. Maria Eugênia Vieira da
Silva, *Ph.D.*

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Nivaldo
Aguiar Freire

FORTALEZA

2019

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

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

C287d Carneiro, Bruno de Alencar.

Desenvolvimento de uma bancada experimental de secagem com roda dessecante e aquecimento por energia solar fotovoltaica / Bruno de Alencar Carneiro. – 2019.
174 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2019.

Orientação: Profa. Dra. Maria Eugênia Vieira da Silva.

Coorientação: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire.

1. Secagem. 2. Dessecante. 3. Desumidificação. 4. Fotovoltaico. I. Título.

CDD 620.1

BRUNO DE ALENCAR CARNEIRO

DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA EXPERIMENTAL DE SECAGEM COM
RODA DESSECANTE E AQUECIMENTO POR ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em 27/08/2019

BANCA EXAMINADORA

Profa. Maria Eugênia Vieira da Silva, Ph. D. (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Sergio Bezerra Sombra
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A meus pais Alberto Gentil da Silva
Carneiro e Goiavane de Alencar
Carneiro.

A meus avós Eurico Ferreira de
Alencar e Maria Ribeiro Alencar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar, proteger e proporcionar forças para todas as oportunidades que ele deu e vem dando ao longo da minha vida.

Aos meus pais, Alberto e Goiavane, por todo carinho, dedicação e educação que me deram por toda minha vida, além do grande suporte pela minha escolha de carreira, inspirado na profissão de meu pai.

Aos meus avós, que são exemplos de força e superação na vida. Principalmente meu avô, que sua vontade de vida neste momento crítico me inspira a nunca perder as esperanças.

A Carolinne, por me dar forças durante o presente trabalho, além de me inspirar com sua determinação e me tratando sempre carinhosamente.

Aos meus amigos, colegas de turma e professores, que fizeram parte da jornada de vida, desde colegial, durante o curso de Engenharia Industrial Mecânica do IFMA, o intercâmbio pelo Ciências Sem Fronteira Coreia do Sul, aos colegas e professores do mestrado, pelos momentos de companheirismo, trabalho, críticas e sugestões.

A minha Orientadora Prof.^a Maria Eugênia Vieira da Silva, Ph. D., por toda a ajuda e aconselhamento durante o mestrado, e por me escolher para a execução deste trabalho. Ao meu Coorientador Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire, por toda a paciência e empenho durante as etapas de construção e aquisição dos materiais da bancada apresentada neste trabalho.

Ao pessoal envolvido na construção da bancada, desde o processo burocrático de aquisição da roda dessecante no exterior até a instalação elétrica e estrutural no laboratório.

À UFC e ao CNPq, pelo aporte da bolsa de Mestrado, pelo presente trabalho com financiamento dos equipamentos do laboratório realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e o Processo Universal N° 445968-2014-1.

“Todas as vitórias ocultam uma
abdicação”.

(Simone de Beauvoir)

RESUMO

Este trabalho apresenta as modificações realizadas em uma bancada de secagem com aquecimento elétrico da corrente de ar de processo para incluir a instalação de uma roda dessecante, que aquece e desumidifica o ar de processo. O objetivo da bancada é levantar curvas de secagem de amostras, em níveis de temperatura regulados por controladores PID, possibilitando o estudo da secagem sob diferentes condições psicrométricas do ar. Estão incluídos neste estudo a reforma da bancada de secagem com aquecimento do ar por resistências elétricas, a instalação da roda dessecante, a montagem do sistema de aquisição de dados, a realização de experimentos e a análise de resultados de curvas de secagem. Os componentes incluem ventiladores, controlador de fluxo mecânico, resistências elétricas e controlador de temperatura. As variáveis medidas foram: temperatura de bulbo seco (TBS), umidade relativa e velocidade do ar, temperatura da amostra e sua massa, em uma balança semianalítica. Foram realizados experimentos de secagem com amostras de banana a TBS de 50 °C e de maçã a 71,5 °C, para proporcionar uma comparação do desempenho da bancada de secagem com dessecante à bancada com aquecimento elétrico, nas mesmas condições iniciais do ar e massa da amostra. Também foi analisada a viabilidade econômica do acionamento da bancada por um sistema fotovoltaico. Os resultados mostraram que o tempo de secagem para a bancada com dessecante, comparada à bancada com aquecimento elétrico, foi reduzido em 22,7% para amostras de banana e 50% para amostras de maçã. A redução do consumo elétrico ao longo do processo de secagem, através do controlador PID em relação ao uso contínuo das resistências, foi de 53,5% para a banana e 66% para a maçã. O dimensionamento do sistema fotovoltaico isolado para a bancada apresentou um orçamento 46,7% menor para a secagem com dessecante em relação à bancada com aquecimento elétrico para a secagem de banana. Já o custo do sistema conectado à rede apresentou uma economia média de 40,13% em relação ao sistema autônomo.

Palavras-chave: Secagem. Dessecante. Desumidificação. Fotovoltaico.

ABSTRACT

This study presents the modifications made on a drying testbench with electrical heating of the process airflow to include the installation of a desiccant wheel, that heats and dehumidify the process air. The purpose of the bench is to perform sample drying curves at temperature levels regulated by PID controllers, allowing drying curves analysis under different psychrometric air conditions. This study includes the reform of the drying test bench with air heating by electric resistances, the desiccant wheel installation, the assembly of a data acquisition system, the drying experiment and the analysis of drying curve results. The components consist of fans, mechanical flow controller and electric heating resistances with temperature controller. The measured variables were dry bulb temperature (DBT), relative humidity and velocity of the air, temperature and mass of a sample in a semi-analytical scale. Drying experiments were performed with banana samples at 50 °C DBT and with apple at 71.5 °C DBT, in order to compare the performance of the drying test bench with desiccant to the bench with sensible heating under the same initial air conditions and sample mass. Also, the economic viability of a photovoltaic system on the drying bench was analyzed. Results showed that the drying time for the bench with desiccant wheel was reduced by 22.7% for banana samples, compared to the electric heating bench, and 50% for apple samples. Power consumption economy, due to temperature PID control on the resistance group during the drying process, was 53.5% for banana and 66% for apple samples compared to the consumption of the continuous use of resistances. The off-grid photovoltaic system sizing at the drying bench presented a 46.7% lower cost for the bench with desiccant wheel compared to the bench with electric resistance heating. The grid-tie photovoltaic systems showed an average cost reduction of 40.13% compared to the off-grid photovoltaic systems.

Keywords: Drying. Desiccant. Dehumidification. Photovoltaics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estágios de secagem de um sólido úmido	28
Figura 2 – Representação do processo de secagem	30
Figura 3 – Tipos de umidade em um sólido	32
Figura 4 – Relação entre teor de umidade no alimento e suscetibilidade a contaminação	33
Figura 5 – Curva de secagem de um sólido em relação ao tempo	34
Figura 6 – Taxa de secagem versus teor de umidade do sólido	35
Figura 7 – Tipos de secadores solares	39
Figura 8 – Secador de leito fluidizado	41
Figura 9 – Esquemático de uma roda dessecante	44
Figura 10 – Classificação das isotermas de adsorção	47
Figura 11 – Detalhe da roda dessecante artesanal com compartimento de grãos de sílica gel soltos	53
Figura 12 – (a) Eficiência energética para diferentes tipos de secadores. (b) Degradação de vitamina C para a secagem com e sem desumidificação do ar, ambas a uma eficiência energética de 60%..	54
Figura 13 – Diagrama esquemático do secador com (a) e sem roda dessecante (b), seus estados termodinâmicos (c) e curvas de desempenho (d)..	55
Figura 14 – Diagrama esquemático do secador com leito dessecante e módulo fotovoltaico integrado a um coletor solar térmico de ar	56

Figura 15 – (a) Variação do teor de umidade de amostras de gengibre durante o tempo de secagem e (b) curva da taxa de secagem em relação ao teor de umidade	57
Figura 16 – Diagrama da bancada experimental de secagem com aquecimento de ar por resistências elétricas	59
Figura 17 – Fluxos de ar de processo e de regeneração na roda dessecante ...	60
Figura 18 – Posicionamento da bancada experimental de secagem dessecante	61
Figura 19 – Fotografia da roda dessecante	63
Figura 20 – Banco de resistências aletadas e a ligação elétrica a partir dos contadores e o controlador de temperatura	64
Figura 21 – Posicionamento dos instrumentos de medição da bancada experimental de secagem dessecante	67
Figura 22 – Localização dos sensores na bancada	68
Figura 23 – Esquema de ligação do sensor de corrente não-invasiva à placa Arduino	69
Figura 24 – Fluxograma do algoritmo de aquisição de dados na planilha Excel.	71
Figura 25 – Planilha de aquisição de dados dos instrumentos da bancada experimental de secagem dessecante	71
Figura 26 – Diagrama esquemático dos sistemas FV isolado (a) e conectado à rede (b)	74
Figura 27 – Fluxograma do dimensionamento do sistema de placas fotovoltaicas para obtenção de energia elétrica	75
Figura 28 – Fotografia da bancada de secagem com o sistema de aquisição de dados	79

Figura 29 – Foto do processo de aquisição de dados	80
Figura 30 – Ilustração da planilha com a medição e tratamento dos dados após uma secagem	81
Figura 31 – Carta psicrométrica com os pontos medidos durante a secagem de banana	82
Figura 32 – Desenho esquemático dos pontos de medição na realização do teste de secagem	83
Figura 33 – Imagens da amostra de fatias de bananas descascadas antes (esquerda) e depois (direita) do experimento de secagem	86
Figura 34 – Curvas de secagem de fatias de banana madura com a bancada de secagem com roda dessecante e de Freire (1999)	87
Figura 35 – Curvas de secagem e a temperatura interna das amostras de banana	87
Figura 36 – Imagens da amostra de fatias de maçãs descascadas antes (esquerda) e depois (direita) do experimento de secagem	89
Figura 37 – Gráfico de secagem de amostras de maçã fatiadas	90
Figura 38 – Curva de secagem de amostras de maçã fatiadas com a temperatura interna do alimento	90
Figura 39 – Leitura de corrente e resposta em temperatura do ar aquecido após o grupo de resistências para a secagem de banana	92
Figura 40 – Leitura de corrente e resposta em temperatura do ar aquecido após o grupo de resistências para a secagem de maçã	93
Figura 41 – Custos dos componentes para as configurações de sistema fotovoltaico isolado para a secagem de banana e retorno de investimento sob tarifa de 0,76 R\$/kWh e reajuste anual de 4,96% (ANEEL, 2019)	97

Figura 42 – Custos dos componentes do sistema fotovoltaico conectado à rede para alimentação da bancada para a secagem de banana sob tarifa de 0,76 R\$/kWh e reajuste anual de 4,96% (ANEEL, 2019)	99
Figura 43 – Diagrama fotovoltaico isolado para a bancada de secagem de banana	126
Figura 44 – Diagrama fotovoltaico conectado à rede para a bancada de secagem de banana	126
Figura 45 – Soprador industrial Ventisilva E11 ALCD	158
Figura 46 – Resistência aletada Eltra	159
Figura 47 – Controlador PID de temperatura Inova INV-4003	160
Figura 48 – Registrador gráfico de Temperatura e Umidade Relativa do Ar e Software de leitura iConnect	161
Figura 49 – Sensor de velocidade e temperatura do ar FMA-1001A-V1 com o respectivo Software de registro gráfico FMA-HFF 1000	163
Figura 50 – Registrador de temperatura OMEGA RDXL12SD (esquerda) e sonda termopar hipodérmica tipo T HYP0-33-1-T-G-60-SMP-M (direita)	165
Figura 51 – Dimensões da roda dessecante	166
Figura 52 – Balança semi-analítica Shimadzu UX6200H	167

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Propriedades representativas de adsorventes porosos comerciais	43
Tabela 2	– Comparativo dos resultados dos parâmetros encontrados na secagem realizada por Yahya et al. (2016)	51
Tabela 3	– Levantamento do consumo e tempo de uso dos equipamentos da bancada experimental de secagem para demanda de carga	76
Tabela 4	– Médias mensais de Horas de Sol Pleno e da radiação solar incidente na superfície horizontal	76
Tabela 5	– Resultados experimentais de umidade e temperatura do ar durante o processo de secagem na bancada experimental com roda dessecante	84
Tabela 6	– Resultados experimentais de secagem da banana e da maçã na bancada experimental de Freire (1999) e na bancada de secagem com roda dessecante	85
Tabela 7	– Resultados experimentais de massa inicial e final das amostras de banana durante a secagem na bancada com roda dessecante a temperatura de 50 °C	88
Tabela 8	– Resultados experimentais de massa inicial e final das amostras de maçã durante a secagem na bancada com roda dessecante a temperatura de 71,5 °C	91
Tabela 9	– Dados elétricos dos componentes da bancada de Souza (2017) (A) e da bancada com roda dessecante (B, C e D) para a secagem de banana	94
Tabela 10	– Resultados teóricos do dimensionamento do sistema fotovoltaico isolado para a secagem de banana	95
Tabela 11	– Resultados do dimensionamento do sistema fotovoltaico	

conectado à rede para amostras de banana	98
Tabela 12 – Especificação do microventilador Ultrar DF12038HBL2	158
Tabela 13 – Especificação da resistência de aquecimento Eltra	159
Tabela 14 – Especificação do controlador PID de temperatura Inova INV-4003/J	160
Tabela 15 – Especificação do registrador gráfico de temperatura e umidade OMEGA iTHX-SD	162
Tabela 16 – Especificação do sensor de temperatura e velocidade do ar OMEGA FMA100A1-V1	163
Tabela 17 – Especificação registrador de temperatura OMEGA RDXL12SD e sonda termopar hipodérmica tipo T HYP0-33-1-T-G-60-SMP-M	165
Tabela 18 – Especificação da roda dessecante Rotorsource C-220-100	166
Tabela 19 – Especificação da balança semianalítica Shimadzu UX6200H	167
Tabela 20 – Especificação do sensor não-invasivo de corrente YHDC SCT-013	168
Tabela 21 – Especificação dos painéis fotovoltaicos escolhidos no dimensionamento	169
Tabela 22 – Especificação dos inversores off-grid utilizados	169
Tabela 23 – Especificação dos controladores de carga off-grid utilizados	170
Tabela 24 – Especificação da bateria utilizada	170
Tabela 25 – Especificação dos inversores grid-tie utilizados	170

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
API	<i>Application Programming Interface</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineering</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CA	Corrente Alternada
CFC	Clorofluorocarbonetos
DPS	Dispositivos de proteção contra Surtos
FAO	Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação
FV	Fotovoltaico
HSP	Horas de Sol Pleno
IP	<i>Internet Protocol</i>
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>
RTD	<i>Resistance temperature detector</i>
SPPM	Seguimento do Ponto de Potência Máxima
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TRNSYS	<i>Transient System Simulation Tool</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

LISTA DE NOMENCLATURA

A	Área [m ²]
a	coeficiente de inclinação de uma reta
b	coeficiente de translação de uma reta
C	Capacidade [Ah]
C _p	Calor específico [J/kg.K]
E	Demanda de energia elétrica diária [Wh/dia]
H	Entalpia da mistura [kJ/kg]
HSP	Hora de Sol Pleno [Horas]
I	Corrente [A]
L	Comprimento [m]
m	Massa [g, kg]
n	Quantidade em unidades (componentes, dias, etc.)
N	taxa de secagem [kg/m ² .s]
P	Pressão [Pa]
Per	Perímetro [m]
Pot	Potência [W]
P _d	Profundidade de Descarga da Bateria [%]
T	Temperatura [°C ou K]
t	tempo [segundos, horas]
u	velocidade do ar [m/s]
V	Tensão [V]
X	teor de umidade no sólido [kg _{vapor} /kg _{sólido seco}]
Z	espessura [mm]

Grego

Δ	Diferença
δ	espessura do feltro dessecante [m]
cosφ	Fator de potência [adimensional]
Φ	umidade relativa do ar [%]

η	Rendimento [%]
ρ	Densidade [kg/m ³]
σ	Condutividade elétrica [m/Ω/mm ²]
μ	umidade absoluta do ar [kg _{vapor} /kg _{ar seco}]
v	volume específico da mistura [kg/m ³]

Subscritos

1	Estado inicial
2	Estado final
ar	Ar
b	Bandeja
b	Umidade ligada
bat	Bateria
BS	Bulbo seco
c	Controlador
c	Crítico
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
cond	Condução
conv	Convecção
C20	Regime de descarga de 20 horas da bateria
d	Descarga
F	energia
F1	energia no primeiro ano
FV	Fotovoltaico
g	Grão
GT	<i>Grid-tie</i>
inf	Inferior
inv	Inversor
ISPPM	Seguimento de ponto de potência máxima do inversor
MA	Média anual

mp	Máxima potência
m,log	Média logarítmica
Nca	Nominal em corrente alternada
nom	Nominal
OG	<i>Off-grid</i>
oc	<i>Open-circuit</i>
p	Partícula
pay	Retorno de investimento
pn	Nominal com perdas
sat	Saturado
t	Total (umidade)
s	Sólido
sc	<i>Short-circuit</i>
sis	Sistema
SPPM	Seguimento do Ponto de Potência Máxima
ss	Sólido seco
st	Seção transversal
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
sup	Superior
Tmax	Temperatura máxima
Tmin	Temperatura mínima
unit	Unitária

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	OBJETIVOS	26
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
3.1	Definição	27
3.2	Psicrometria	29
3.3	Cinética de secagem	29
3.4	Classificação dos sistemas de secagem	37
3.5	Processo de sorção	41
3.5.1	<i>Roda dessecante</i>	43
3.5.2	<i>Propriedades do dessecante</i>	45
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	49
4.1	Sistemas com roda dessecante para secagem	52
4.2	Sistemas com geração de energia solar fotovoltaica	55
5	MATERIAIS E MÉTODOS	58
5.1	Bancada experimental de secagem com roda dessecante e regeneração por resistências elétricas	58
5.2	Seleção da roda dessecante	63
5.3	Escolha e instalação do banco de resistências elétricas e controlador de temperatura	64
5.4	Coleta de dados	65
5.5	Preparação e medição da amostra	72

5.6	Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico para Alimentação da Bancada	73
5.6.1	<i>Análise de retorno de investimentos de sistemas fotovoltaicos</i>	77
6	RESULTADOS	79
6.1	Bancada de secagem com roda dessecante	79
6.2	Resultados psicrométricos	81
6.3	Curvas de secagem e comparação da secagem com Freire (1999) .	84
6.4	Medições de consumo de energia das operações de secagem	91
6.5	Resultados experimentais do sistema fotovoltaico para alimentação da bancada	93
6.5.1	<i>Sistema FV Autônomo</i>	95
6.5.2	<i>Sistema FV Conectado à Rede</i>	97
7	CONCLUSÃO	100
	REFERÊNCIAS	102
	APÊNDICE A – DESENHO DA BANCADA DE SECAGEM.....	109
	APÊNDICE B – DIAGRAMA DE LIGAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO E CONECTADO À REDE AO SISTEMA DE SECAGEM	126
	APÊNDICE C – ALGORITMO EM VB DE AQUISIÇÃO DE DADOS POR COMUNICAÇÃO SERIAL VIA PLANILHA DA BALANÇA E DO SENSOR DE TEMPERATURA E VELOCIDADE DO AR	127
	APÊNDICE D – ALGORITMO EM VB DE AQUISIÇÃO DE DADOS POR COMUNICAÇÃO USB VIA ARDUINO DO SENSOR NÃO- INVASIVO DE CORRENTE ALTERNADA	138

ANEXO A – CARTA PSICROMÉTRICA ASHRAE N° 3	140
ANEXO B – ROTEIRO DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÔNOMO E CONECTADO À REDE	142
Sistema Fotovoltaico Autônomo	144
Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede	152
ANEXO C – COMPONENTES DA BANCADA	158
ANEXO D – COMPONENTES DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADO E CONECTADO À REDE	169
ANEXO E – ALGORITMO EM LINGUAGEM VB DE AQUISIÇÃO DE DADOS POR COMUNICAÇÃO ETHERNET VIA PLANILHA DO REGISTRADOR GRÁFICO DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA	171

1 INTRODUÇÃO

A secagem faz parte de um conjunto de operações unitárias de importância na cadeia global de alimentos, que possibilita a conservação de alimentos e outros produtos, ao retirar o teor de umidade do alimento por meio de uma diferença de pressão parcial do vapor na corrente de ar de secagem e a pressão parcial da água em um sólido. O processo garante o aumento da vida útil do produto, com conservação de nutrientes e a redução de perdas pós-colheitas. A manutenção de nutrientes e a extensão da validade de alimentos em uma cadeia de suprimentos na indústria alimentícia cada vez mais complexa são um desafio diante do paradigma do crescimento populacional e sua demanda nutricional. A população mundial chegou a 7 bilhões no ano de 2017 e, segundo previsões da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), é esperado alcançar 9,7 bilhões até 2050. Para que a produção mundial de alimentos acompanhe este ritmo, é preciso aumentar a oferta alimentícia em 60% no mesmo período (FAO, 2018).

O aumento da eficiência de colheita e transporte de alimentos depende de recursos econômicos e ambientais favoráveis. Uma vez que a maioria das matérias-primas são produzidas em climas tropicais quentes e úmidos - regiões de maior propensão a proliferação de microorganismos, a possibilidade de contaminação de produtos agrícolas, devido a secagem insuficiente, por toxinas de fungos e bactérias pode afetar 4,5 bilhões de pessoas (Bourdoux *et al.*, 2016; Bradford *et al.*, 2017). Segundo a FAO (2018), 40% do desperdício de alimentos nos países em desenvolvimento ocorre nas etapas de pós-colheita e processamento. Desta maneira, faz-se necessário um controle de secagem em alimentos.

Diversas tecnologias de secagem estão disponíveis na agricultura e indústria. Sistemas que exigem baixo nível de especialização de mão-de-obra, como secadores solares e semi-industriais, são utilizados na agricultura de subsistência ou familiar. Conforme necessidade da indústria, o nível de complexidade destes processos aumenta e soluções se diversificam, a exemplo de secadores a leitos fluidizados, a aspensão, a vácuo, por bomba de calor, entre outros. Há sistemas que adotam outros princípios

físicos para promover a retirada de teor de umidade do seu produto, como a liofilização (*freeze-drying*), a secagem por microondas e com dessecante – usados em produtos mais sensíveis ao calor e em germoplasmas (Chua e Chou, 2003; Celestino, 2010; Atonwu *et al.*, 2011; Bradford *et al.*, 2017). Segundo Misha *et al.*, 2012, o processo de secagem consome 12% da energia total usada na indústria dos setores alimentícios no mundo.

Na secagem com dessecante, a bancada de estudo neste trabalho, é operada a baixas temperaturas, através da desumidificação do ar por adsorção, pela retenção de umidade através de um material higroscópico, isto é, com tendência a reter umidade dentro de sua estrutura.

A refrigeração com dessecante é uma alternativa ao sistema de refrigeração por compressão de vapor que, embora predomine no mercado, enfrenta desde o início dos anos 90, a proibição de emissão dos gases clorofluorcarbonetos (CFC) - que impactam a camada de ozônio, e a redução de gases causadores do efeito estufa. Ao aproveitar calor residual de outras fontes, a eficiência energética de sistemas de refrigeração com dessecante se torna competitiva em relação a sistemas de compressão a vapor, com a vantagem adicional da redução de emissão de gases poluentes.

Entre os sistemas de refrigeração alternativos, há refrigeradores de absorção, efeito Peltier (termoelétrico), tubo de vórtice, nanofluidos, materiais de mudança de fase (da Silva, de Medeiros, Gurgel, 2016; Clemente, 2018).

Devido à tecnologia dessecante ser mais utilizada na área de refrigeração, não se observa a mesma quantidade de artigos publicados em processos de secagem e conservação de alimentos (Marcotte e Grabowski, 2008; Misha *et al.*, 2012; Bradford *et al.*, 2017). A desumidificação com dessecante fornece um fluxo de ar com baixas umidade absoluta e temperatura, de modo a preservar a estrutura do alimento desidratado e reduz os custos de energia envolvidos em processos industriais. O consumo energético nestes processos representa até 10% dos custos de manufatura de produtos na indústria alimentícia e de bebidas, contudo tecnologias de secagem (leito fluidizante, infravermelho, roda dessecante), têm potencial de redução entre 10 e 50%

do consumo energético nesta etapa de produção dos alimentos (Navarri, Fortin e Taylor, 2003, apud Marcotte e Grabowski, 2008).

O objetivo deste trabalho é a construção de uma bancada de secagem usando rodas dessecantes, com a possibilidade de acionamento por sistema solar fotovoltaico. A bancada possibilita o levantamento de curvas de secagem em diferentes condições de temperatura e umidade absoluta do fluxo de ar de processo.

As metas para o trabalho incluem: adaptação da bancada existente com adição de linha de regeneração; fabricação de novos dutos e aquisição de componentes; desenvolvimento de sistema de aquisição de dados; secagem de amostras em condições pré-determinadas; dimensionamento de um sistema fotovoltaico para aquecimento da bancada; e a análise de resultados.

O acionamento fotovoltaico foi analisado visando a viabilidade do projeto para a alimentação elétrica das resistências e dos ventiladores da bancada, considerando-se os custos dos componentes e a tarifa local de energia elétrica. Assim, o trabalho visa promover o levantamento de curvas de secagem em condições menos agressivas às amostras de alimentos, caracterizadas por menor temperatura e umidade relativa do fluxo de ar de processo, pela utilização de roda dessecante e possibilidade de acionamento fotovoltaico.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo

Modificação e ajustes de uma bancada experimental para levantamento de curvas de secagem operando com roda dessecante e possibilidade de acionamento das resistências de aquecimento e ventiladores por módulos fotovoltaicos.

2.2 Objetivos específicos

- a) Aperfeiçoar o projeto de uma bancada de secagem com resistências elétricas e utilizar rodas dessecantes para desumidificação de ar, operando a baixa temperatura e umidade absoluta do fluxo de ar;
- b) Utilizar um banco de resistências elétricas aletadas de aquecimento do ar, instalado após os ventiladores, para regenerar a roda dessecante e garantir uma desumidificação contínua;
- c) Conceber, instalar e operar sistema de aquisição de dados com medições de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar;
- d) Fabricar dutos de ar de processo e de regeneração, de modo a fazer a montagem da bancada com a separação do ar de entrada e de exaustão;
- e) Analisar o uso de energia solar fotovoltaica para o acionamento dos ventiladores e do grupo de resistências de aquecimento, segundo a norma ABNT;
- f) Realizar experimentos de secagem e construir curvas de secagem;
- g) Analisar os resultados.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentados os conceitos que envolvem o tema de secagem, psicrometria, o princípio físico da adsorção e as propriedades dessecantes presentes no trabalho em questão.

3.1 Definição

A secagem é uma operação unitária no qual umidade é removida de um material sólido, líquido ou gás (Treybal, 1981; Celestino, 2010; Dutta, 2010). O processo de secagem utiliza ar quente por convecção livre ou forçada, ou a radiação solar direta, para vaporizar a quantidade interna de água de um sólido, em que a desidratação ocorre através de sua temperatura e umidade absoluta do fluxo de ar que passa pelo sólido.

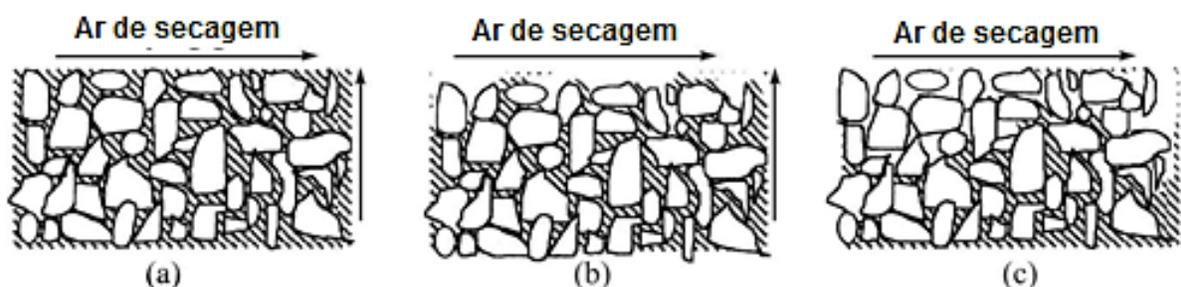
A secagem é governada pelos princípios de transferência de calor e massa. Quando um sólido úmido é exposto ao ar com menor pressão de vapor de água, a água contida dentro do sólido vaporiza sobre ou próxima à sua superfície e o calor necessário para a secagem é geralmente fornecida por um gás quente (ar), por micro-ondas, por resfriamento e, como no princípio operante da roda dessecante, pelo processo de sorção. Com a redução do teor de umidade na superfície do sólido, devido à vaporização, mais água é transportada de dentro do sólido para sua superfície. A água se move dentro do sólido por uma variedade de mecanismos, dependendo da natureza e tipo do sólido. Segundo Dutta (2009), o mecanismo de transporte em diferentes sólidos pode ser amplamente classificado em transporte por forças capilares, difusão líquida, transporte induzido por pressão e difusão de vapor.

O mecanismo dominante no processo de secagem depende da natureza do sólido e da sua estrutura porosa. Diferentes mecanismos podem ser relevantes e dominar em diferentes estágios de secagem do mesmo material. Em sólidos porosos e granulares com uma estrutura porosa aberta, o transporte de água ocorre devido às forças capilares,

enquanto houver umidade suficiente no interior do sólido. A estrutura capilar de um leito geralmente não é uniforme. Os capilares maiores são esvaziados primeiramente e os menores continuam a fornecer líquido à superfície de secagem. Simultaneamente, parte do ar de secagem entra no sólido através de passagens livres e rachaduras. Os volumes do poro e interstícios vagos pelo líquido são, desta forma, ocupados pelo ar e o volume do espaço preenchido pelo ar aumenta conforme a secagem ocorre (Treybal, 1981; Dutta, 2009).

Os estados de um sólido granular úmido em diferentes estágios de secagem estão representados com a região hachurada na Fig. 1 representando a água contida no interior do sólido, em que as setas horizontais indicam o sentido do fluxo de ar de secagem e as verticais representam a direção da difusão de água em um sólido (Dutta, 2009). Na Figura 1(a), o sólido no início do processo de secagem está uniformemente úmido; em (b), a região superior está parcialmente seca e, em (c), a parte superior do sólido está seca. A resistência à difusão da umidade no sólido aumenta e, conseqüentemente, a taxa de secagem decresce de (a) para (b) e para (c).

Figura 1 - Estágios de secagem de um sólido úmido.



Fonte: Adaptado de Dutta, 2009.

3.2 Psicrometria

Antes de se aprofundar no processo de secagem, é preciso entender as condições necessárias para que o ar na câmara de secagem possa extrair água de um sólido. O ar, convencionalmente denominado, é considerado uma mistura de ar seco, composto por vários gases presentes na atmosfera terrestre (78,084% de nitrogênio, 20,948% de oxigênio, 0,9% de argônio, 0,033 de dióxido de carbono e 0,001% de outros gases), e água na forma de vapor - umidade. Suas propriedades termodinâmicas são mostradas em um gráfico, denominado de carta psicrométrica, na qual estas propriedades estão dispostas em diferentes pressões atmosféricas (Silva *et al.*, 2008).

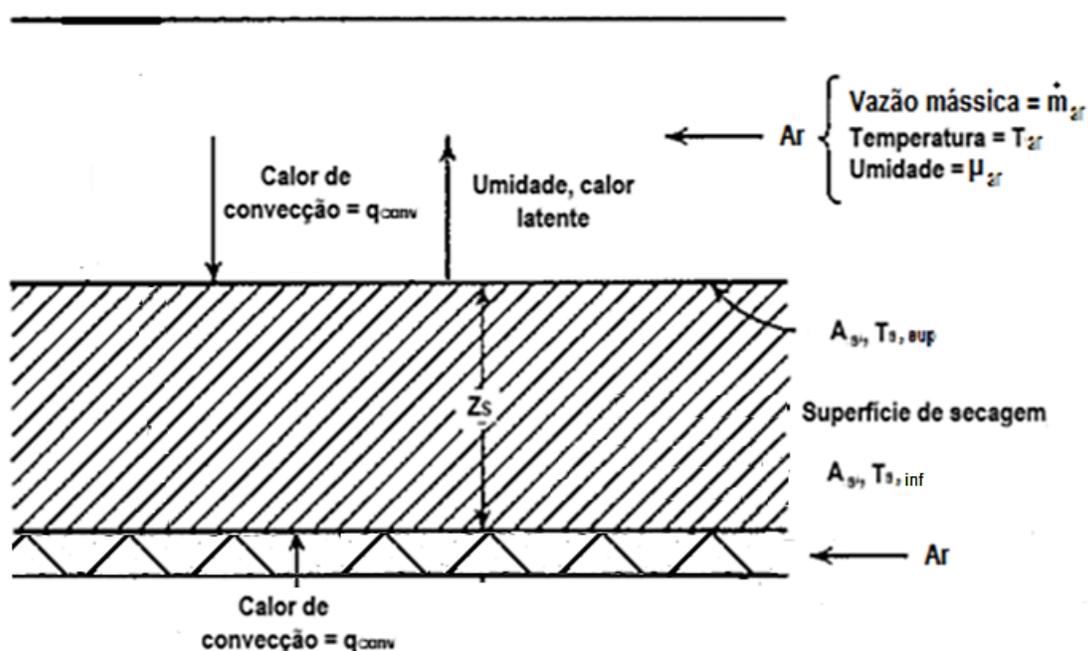
A secagem pode ocorrer à pressão atmosférica ou em pressão inferior, como secadores a vácuo (Celestino, 2010), sendo limitada ou potencializada conforme o clima do local do estudo. As propriedades termodinâmicas do ar são: temperatura de bulbo seco (T_{BS}), temperatura de bulbo úmido (T_{BU}), temperatura de ponto de orvalho (T_{PO}), umidade absoluta (μ), umidade relativa (ϕ), entalpia específica (H) e o volume específico (v). O Anexo A apresenta mais informações sobre a carta psicrométrica e a definição das propriedades termodinâmicas.

3.3 Cinética de Secagem

Durante o processo de desidratação de um sólido, estão envolvidas transferências de calor e de massa, conforme apresentado na Fig. 2. A ilustração mostra o processo de secagem em convecção forçada de um sólido úmido de espessura Z_s , posicionado sobre uma bandeja de espessura Z_b que permite a exposição da superfície inferior do alimento ao ar, imerso em uma corrente de ar de secagem com vazão mássica \dot{m}_{ar} , a uma temperatura de bulbo seco $T_{BS,ar}$ e umidade absoluta do ar μ_{ar} . A evaporação da água do sólido acontece na superfície superior, de área A_s , em contato com a corrente de ar, que está a uma temperatura $T_{s,sup}$ menor que $T_{BS,ar}$. A superfície de secagem

recebe calor sensível pela convecção da corrente de ar q_{conv} , e pela condução através do sólido aquecido q_{cond} . O calor incide sobre a superfície e aquece o sólido, que altera a pressão parcial interna e promove a difusão de água. A água no sólido, por sua vez, parte do interior do sólido para a superfície e, remove calor do sólido para acumular na forma de calor latente e evaporar, sendo conduzido pelo ar de secagem. Com isso, a temperatura da superfície permanece constante a $T_{s,\text{sup}}$ durante o período de taxa de secagem constante.

Figura 2 – Representação do processo de secagem

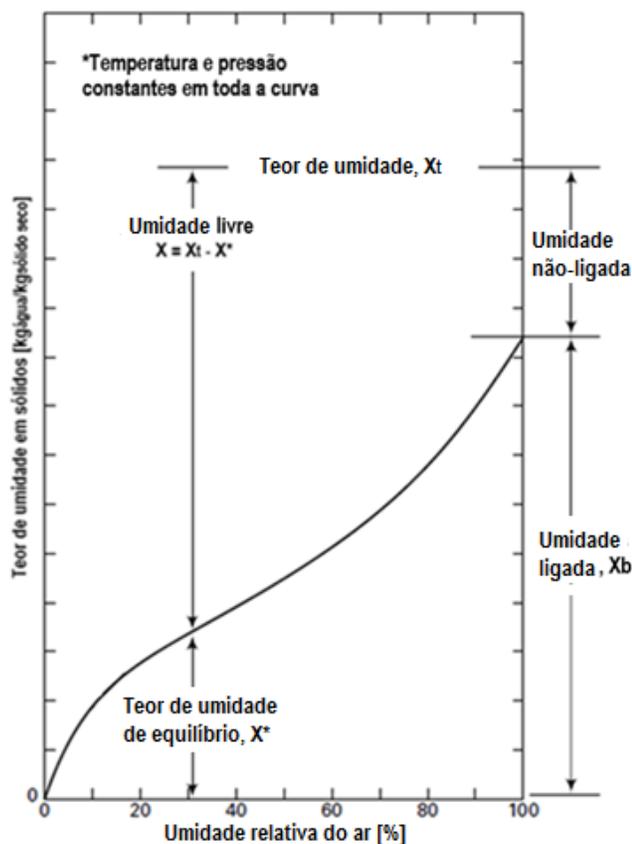


Fonte: Adaptado de Treybal (1981)

O primeiro parâmetro estudado na secagem é o teor de umidade em um sólido, no qual a sua redução impede a proliferação de microrganismos e alterações por reações químicas e enzimáticas em alimentos (Bradford *et al.*, 2017). O teor de umidade é a razão entre a massa de água e a massa total do alimento e pode ser calculado em função da massa úmida (base úmida) ou da massa seca (base seca, sólido desidratado).

Nos sólidos higroscópicos, a umidade está contida em três formas: umidade ligada, não-ligada e livre, sendo o teor de umidade do sólido a soma dessas parcelas (Treybal, 1981; Seader, Henley e Roper, 2010). A Figura 3 mostra a curva isoterma do teor de umidade de um sólido em equilíbrio com o ar, X^* , nas três formas em uma isoterma de um alimento, sendo o eixo horizontal a faixa de umidade relativa do ar, o eixo vertical o teor de umidade no sólido em base seca. A umidade ligada do sólido, X_b , exerce uma pressão parcial de vapor menor que a pressão parcial de vapor saturado a mesma temperatura, isto é, abaixo da curva de teor de umidade de equilíbrio. Quando a umidade relativa do ar é 100%, o teor de umidade de equilíbrio do sólido é igual à umidade ligada. Se o sólido úmido tiver um teor de umidade X_t maior que o equilíbrio, este excesso ($X_t - X^*$) é chamado de umidade não-ligada do sólido. A uma umidade relativa do ar menor que 100%, o excesso de X_t sobre o teor de umidade de equilíbrio, $X_t - X^*$, é a umidade livre. Se a umidade relativa do ar for 0%, todos os sólidos, após o tempo necessário para estabilização da medição de massa, podem ter a umidade ligada retirada após alcançar um estado de secagem completa (Seader, Henley e Roper, 2010).

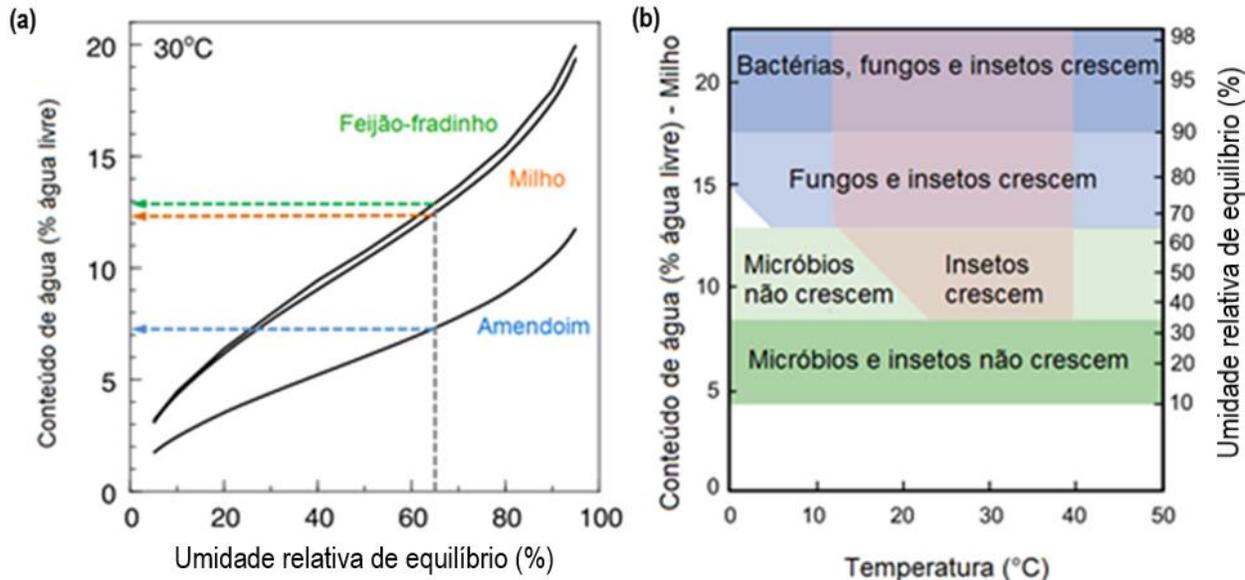
Figura 3 - Tipos de umidade em um sólido



Fonte: Adaptado de Seader, Henley e Roper (2010)

É através do controle da umidade não-ligada e livre do alimento, que se impede o crescimento de microorganismos e, desta forma, a vida útil do produto (Treybal, 1981; Celestino, 2010; Bradford *et al.*, 2017), como mostra a Fig. 4. No lado esquerdo, a Fig. 4 (a) mostra curvas de umidade relativa do ar em equilíbrio com o teor de umidade de grãos de feijão-fradinho, milho e amendoim a 30°C. No lado direito, a Fig. 4 (b) apresenta um diagrama ilustrando as combinações de temperatura, teor de umidade do grão e a equivalente umidade relativa de equilíbrio, no qual diferentes organismos podem se proliferar durante o armazenamento de grãos de milho. Abaixo de 65% de umidade relativa de equilíbrio, alimentos estão salvos de crescimento de fungos, e abaixo de 35%, nem micróbios nem insetos conseguem crescer.

Figura 4 - Relação entre teor de umidade no alimento e suscetibilidade a contaminação

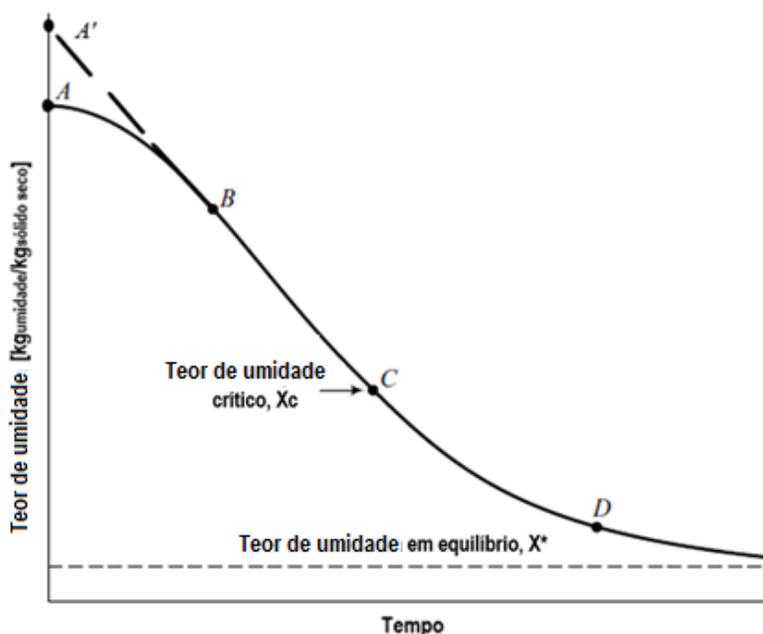


Fonte: Adaptado de Bradford *et al.* (2017).

A cinética de secagem é controlada pelas características estruturais do alimento e pelas variáveis temperatura, velocidade e umidade relativa do fluxo de ar (Treybal, 1981; Seader, Henley e Roper, 2010). A variação do teor de umidade do sólido em função do tempo é representada pela curva de secagem do alimento. Na curva da Fig. 5, (A) é um sólido inicialmente colocado numa câmara de secagem para circulação contínua de ar seco sobre sua superfície. Se um sólido está muito úmido (A'), a superfície irá ser coberta com uma película fina de líquido, o teor de umidade não-ligado. (B) representa o início do período de taxa de secagem constante, também visto no gráfico de taxa de secagem e teor de umidade do sólido da Fig. 6, que termina em (C), quando o teor de umidade do sólido alcança um valor X_c , o teor crítico de umidade. A partir deste ponto, a película da superfície de água é tão reduzida pela evaporação ao ar seco que surgem pontos secos sobre a superfície e aumentando sobre a superfície exposta conforme a secagem prossegue. A taxa de secagem N , no período de (C) a (D), decresce mesmo que a taxa por unidade de superfície úmida permaneça constante – devido ao encolhimento do sólido. Por último, a película original de líquido terá sido inteiramente evaporada a um teor médio de umidade do sólido correspondente ao ponto (D). Em

alguns casos, a evaporação começa a ocorrer debaixo da superfície do sólido. No segmento DE, a taxa de secagem cai de forma mais aguda até se estabilizar no ponto (E), em que o teor interno de água do sólido chega até ao nível do teor de umidade do sólido X^* em equilíbrio com o ar de secagem, cessando a redução de massa (Treybal, 1981).

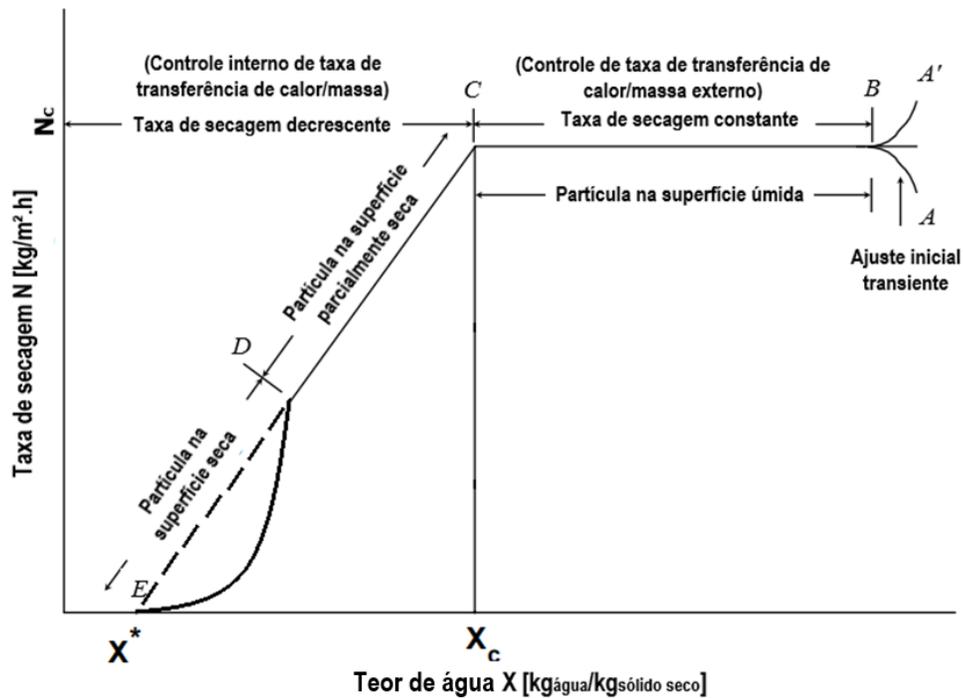
Figura 5 - Curva de secagem de um sólido em relação ao tempo



Fonte: Adaptado de Treybal (1981)

A Figura 6 mostra o mesmo processo representado na Fig. 5, porém, sob o gráfico da taxa de secagem versus o teor de umidade no sólido. A taxa de secagem é definida como a variação de teor de umidade por unidade de área da superfície exposta do sólido em um intervalo de tempo e representado pela letra N. A curva da Fig. 6 é caracterizada por dois períodos: um intervalo de taxa de secagem constante BC e outro com taxa decrescente CE. O início da curva, a região AB ou A'B, representa um ajuste inicial transiente e varia conforme sólido testado (Treybal, 1981).

Figura 6 – Taxa de secagem versus teor de umidade do sólido



Fonte: Adaptado de Treybal (1981).

A taxa de secagem N , em $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, é medida pela tangente na curva de secagem, isto é, pela derivada do teor de umidade do sólido em relação ao tempo dX/dt , e é calculada por:

$$N = - \left(\frac{m_{ss}}{A} \cdot \frac{dX}{dt} \right) \quad (1)$$

na qual m_{ss} é a massa de sólido seco, A é a superfície molhada sobre o qual o fluxo de ar escoia e onde a evaporação ocorre. Rearranjando e integrando no intervalo de tempo enquanto o teor de umidade do sólido muda a partir de seu valor inicial X_1 para seu valor final X_2 , obtém-se o tempo de secagem,

$$t = \int_0^t dt = \frac{m_{ss}}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{N} \quad (2)$$

O segmento AB das Fig. 5 e 6 corresponde ao período em que o alimento se adapta às condições de secagem e a taxa dX/dt cresce, enquanto a água livre estiver sendo evaporada. Se um sólido está inicialmente muito úmido, a superfície é coberta com uma película fina de líquido, a umidade não-ligada. Quando é exposto ao ar relativamente seco, a evaporação ocorre a partir da superfície (Treybal, 1981).

A taxa se estabiliza e o teor de umidade saturada X_{sat} do sólido, na temperatura da superfície do líquido T_{sat} , são constantes durante o segmento BC. O tempo de secagem sob taxa constante $N = N_c$ é:

$$t = \frac{m_{ss} \cdot (X_1 - X_2)}{A \cdot N_c} \quad (3)$$

Para o cálculo do período de taxa decrescente, a Eq. 2 pode ser integrada graficamente para determinar a área sob a curva de $1/N$ como ordenada, X como abscissa, os dados para os quais podem ser obtidos da curva de taxa de secagem. Se N é linear em X , como na região BC da Fig. 6, obtém-se:

$$N = a \cdot X + b \quad (4)$$

na qual a é a inclinação da parte linear da curva e b é uma constante de integração. Assim,

$$t = \frac{m_{ss}}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{a \cdot X + b} = \frac{m_{ss}}{a \cdot A} \cdot \ln \frac{a \cdot X_1 + b}{a \cdot X_2 + b} \quad (5)$$

Considerando que $N_1 = a \cdot X_1 + b$, $N_2 = a \cdot X_2 + b$, e $a = (N_1 - N_2)/(X_1 - X_2)$, a Eq. 5 é simplificada para:

$$t = \frac{m_{ss} \cdot (X_1 - N_2)}{A \cdot (N_1 - N_2)} \cdot \ln \frac{N_1}{N_2} = \frac{m_{ss} \cdot (X_1 - N_2)}{A \cdot N_{m,\log}} \quad (6)$$

na qual $N_{m,\log}$ é a média logarítmica da taxa de secagem N_1 , sob o teor de umidade do sólido X_1 , e N_2 em X_2 . Uma vez que são necessários dados detalhados para caracterizar a curva de taxa de secagem do intervalo DE, é aconselhável a integração numérica da Eq. (2) para a determinação do tempo de secagem neste período (Treybal, 1981).

3.4 Classificação dos sistemas de secagem

Os critérios de classificação de sistemas de secagem são definidos em relação ao produto a ser desidratado, ao teor de umidade do sólido e ao processo utilizado. Do ponto de vista da amostra, secadores podem ser classificados em três categorias: estáticos, fluidizados e agitados (Prakash e Kumar, 2013). Nos secadores estáticos, o produto é colocado em uma bandeja e não se move em relação a outros objetos de secagem. Este grupo inclui secadores a vácuo, liofilizadores, secadores de bandejas e secadores a vapor superaquecido.

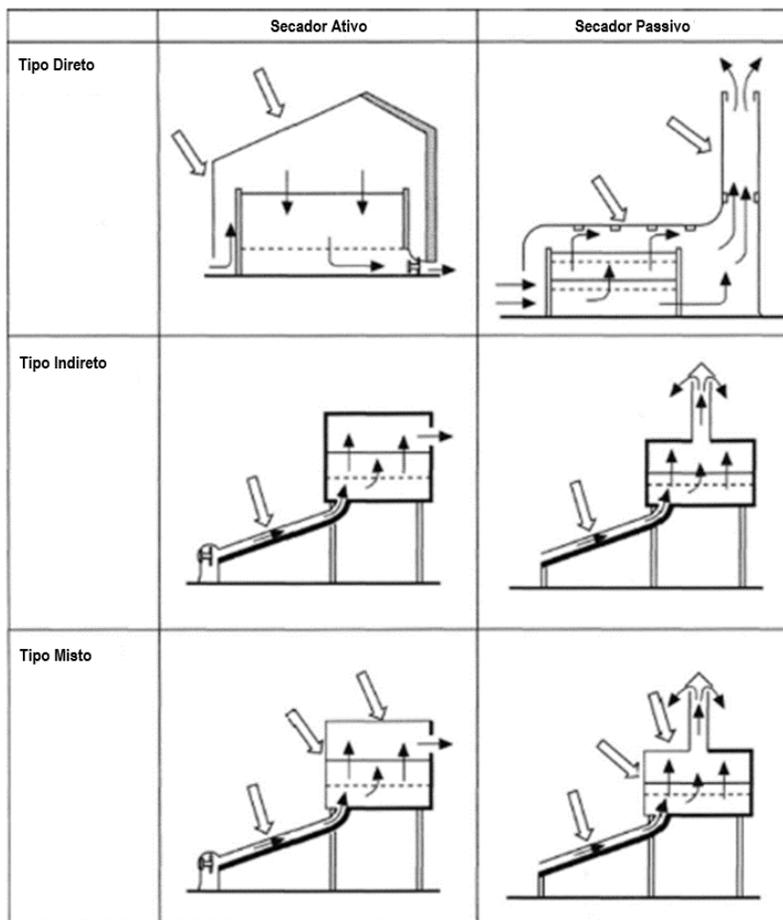
Secadores fluidizados são os sistemas em que o produto de secagem, normalmente partículas finas, é suspenso na câmara para maximizar a área exposta ao ar seco. Exemplos são leitos fluidizados e secadores por pulverização.

Os sistemas de agitação envolvem objetos de secagem (geralmente um granulado ou partículas) misturados mecanicamente para aumentar a exposição à

superfície quente e a homogeneidade da secagem. Os exemplos são os secadores rotativos e de tambor, usados em várias aplicações industriais em massa, como mineração e minerais, química fina e geração de energia. Aplicações típicas incluem cavacos de madeira, secagem de açúcar e biomassa (Kerr, 2013).

Quanto ao mecanismo de secagem e de ventilação, a classificação se divide em secadores diretos e indiretos. A Figura 7 apresenta um diagrama esquemático que ilustra os dois tipos juntamente com secadores de ventilação ativa e passiva. Os secadores diretos, localizados na primeira linha da Fig. 7, são os que recebem radiação direta da fonte de calor, enquanto os indiretos, na segunda linha, somente recebem o ar aquecido na fonte. Há a possibilidade de junção das duas formas de aquecimento no secador misto, na terceira. A outra classificação, em relação à ventilação e presente nas colunas da Fig. 7, divide os secadores em ativos e passivos. Os secadores ativos, na primeira coluna abrange sistemas em que o ar dentro da câmara de secagem flui por convecção forçada, por meio de ventiladores, sopradores ou exaustores. Já secadores passivos, na segunda coluna da Fig. 7, aproveitam correntes naturais de convecção para transportar a umidade retirada do produto ao ambiente externo do secador (Celestino, 2010; Prakash e Kumar, 2013).

Figura 7 - Tipos de secadores solares



Fonte: Adaptado de Prakash e Kumar (2013)

Quanto à fonte de calor, a secagem pode ser natural (ao Sol) ou artificial (fornos, resistências elétricas, liofilização). A secagem natural é o simples repouso do alimento ao Sol, utilizada em regiões com temperatura média de 35°C a 40°C, com boa incidência de radiação solar, baixa umidade relativa do ar e baixo índice de poluição. Não gasta combustível ou eletricidade, porém é menos eficaz devido ao fato do processo ser dependente das condições do ambiente. Em climas onde as condições atmosféricas permitem a secagem ao Sol, apenas o armazenamento em recipientes que mantenham uma baixa umidade é necessário. (Celestino, 2010; Bradford *et al.*, 2017). Alimentos de alta perecibilidade, como frutas, hortaliças, ervas e carnes, devem ter proteção contra

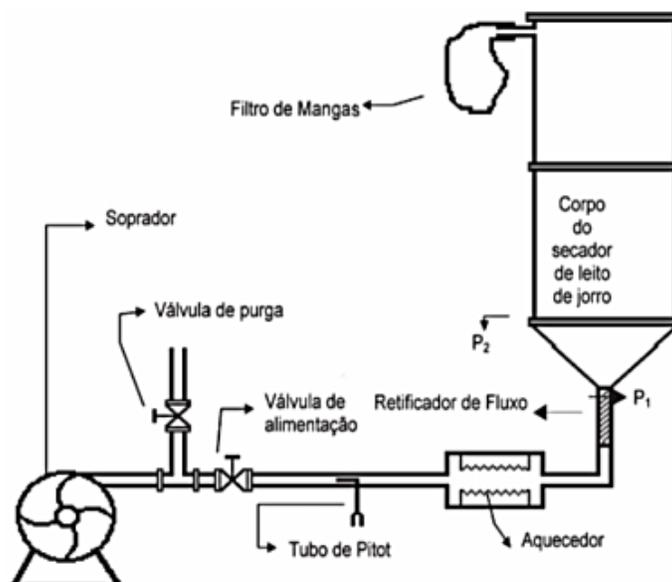
alta umidade do ar, mas, no caso de café e milho para ração animal, a secagem pode ser feita com os grãos espalhados no chão, estando esses apenas sobre uma coberta.

Os alimentos secos ao sol apresentam uma coloração mais intensa que os desidratados artificialmente, no entanto ocorrem maiores perdas nutricionais do que na desidratação sob condições controladas. A secagem natural também pode ser feita de maneira indireta, por secadores que possuem uma estrutura de proteção ao alimento (Celestino, 2010). Nesse caso, o secador possui uma inclinação e um tampo de vidro que permitem a transmissão da radiação solar. O ar é aquecido nessa cabine de vidro, diminui sua densidade e flui nas bandejas sobre o produto a ser seco, saindo na parte superior, em razão das correntes de convecção que são geradas com a entrada de mais ar frio na cabine de secagem.

A secagem industrial utiliza equipamentos nos quais o alimento é colocado, e o processo de desidratação ocorre por um determinado período (batelada) ou de modo contínuo. Na maioria dos processos de secagem industrial, ar quente com velocidade de 0,5 m/s a 3 m/s e baixa umidade é utilizado para a transferência de calor com o alimento. O decréscimo da umidade relativa do ar provoca uma secagem mais eficiente do que com o incremento da temperatura para uma mesma umidade relativa do ar. Uma redução de 5 °C na temperatura duplica a vida útil das sementes, porém o mesmo efeito é obtido com a redução de 1% no teor de umidade de sementes (Robert e Ellis, 1989 apud Bradford *et al.*, 2017). A retenção de vitaminas em alimentos secos industrialmente é, geralmente, superior à dos alimentos secos ao Sol. (Kerr, 2013).

Dentre formatos da câmara de secagem existentes, há secadores de bandeja, de esteira, de túnel, de tambor rotativo, de leito fluidizado. A Fig. 8 mostra o desenho esquemático de um secador de leito fluidizado. Nesse tipo de secador, o ar quente atravessa um leito, onde o alimento sólido está depositado e, pela sua alta velocidade, o ar quente é capaz de fluidizar ou suspender esse alimento pela câmara. O secador de leito fluidizado conta com a vantagem de uma secagem mais homogênea e rápida. Porém, o alimento deve suportar impactos e ser sustentado por uma chapa perfurada, para a passagem do ar. Exemplo de produtos utilizados neste sistema são grãos de ervilha, café, farinha, sal e açúcar (Celestino, 2000).

Figura 8 - Secador de leito fluidizado



Fonte: Celestino (2000)

3.5 Processo de sorção

A sorção (adsorção e dessorção) é um fenômeno que ocorre quando um gás ou um líquido é aprisionado a uma superfície sólida. Ao contrário do processo de absorção, onde as moléculas do fluido penetram no volume do absorvente sólido, a adsorção é um fenômeno no qual as moléculas adsorvidas não se difundem nos interstícios do sólido. Como apresentado em Treybal (1981), existem dois tipos de adsorção: o primeiro é a fisissorção ou adsorção física, um processo reversível que ocorre quando forças intermoleculares relativamente fracas causam a adsorção. O segundo tipo é a quimissorção ou adsorção química, que envolve uma reação química entre o adsorvente e as moléculas adsorvidas, sendo um processo irreversível.

A IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) define os termos relacionados ao fenômeno da adsorção física. O gás adsorvível é o adsortivo, o sólido

adsorvente é o adsorvente, comumente denominado dessecante, e a fase adsorvida é o adsorbato. Moléculas de adsorção se ligam ou se desprendem da superfície do sólido em um processo dinâmico de transferência, e as moléculas que se acumulam na superfície formam uma camada interfacial que possui propriedades semelhantes à fase líquida do adsorvato. A habilidade adsorvativa dos sólidos dessecantes é devido a uma questão de afinidade química do material ou da sua porosidade, causada por forças fracas intermoleculares de Van der Waals. O processo de adsorção é reversível para muitos sistemas de adsorvato-adsorvente (Treybal, 1981; Stiesch, 1994; Seader, Henley e Roper, 2010).

Portanto, adsorventes típicos são sólidos porosos ou pós compactados de diâmetros de 50 micrômetros a 12 milímetros. Os sólidos comuns adsorvem gases e vapores até uma certa quantidade, porém, sem capacidade adsorvativa e específica suficiente para aplicações industriais. Uma grande área por unidade de peso é essencial a todos os adsorventes úteis. Particularmente no caso da adsorção gasosa, a superfície efetiva não é somente a superfície externa do dessecante, mas também a superfície interna dos poros das partículas. Os poros são muito pequenos, na ordem de alguns diâmetros moleculares em largura, mas ao todo, o número de poros fornece uma superfície de adsorção bem maior que a superfície macroscópica (Treybal, 1981; Seader, Henley e Roper, 2010). Sua área específica de superfície interna, expressa como a área por massa [m^2/kg], é, às vezes, muitas ordens de magnitude acima do que sua área de superfície externa. Por exemplo, o carvão ativado utilizado em máscaras de filtragem de gás tem uma superfície efetiva de $10^6 \text{ m}^2/\text{kg}$. Os adsorventes mais comuns, segundo Treybal (1981), são: argila de bentonita, terra de greda ou esmectite, bauxita junto a seu produto derivado alumina, carvão animal, carbonos descolorante, ativado e de peneira molecular; adsorventes poliméricos sintéticos como o estireno; sílica gel e peneiras moleculares. As características de alguns adsorventes estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades representativas de adsorventes porosos comerciais

Adsorvente	Natureza	Diâmetro do poro, d_p [Å]	Porosidade da partícula, ϵ_p	Densidade da partícula, ρ_p [g/cm ³]	Área da superfície, S_g , m ² /g	Capacidade para vapor d'água a 25°C e 4,6 mmHg (base seca)
Alumina ativada	Hidrofílico, amorfo	10-75	0,50	1,25	320	7
Sílica gel:	Hidrofílico /					
- Poro pequeno	hidrofóbico,	22-26	0,47	1,09	750-850	11
- Poro grande	amorfo	100-150	0,71	0,62	300-350	-
Carbano ativado:	Hidrofóbico,					
- Poro pequeno	amorfo	10-25	0,40-0,60	0,50-0,90	400-1200	1
- Poro grande		> 30	-	0,60-0,80	200-600	-
Carbano de peneira molecular	Hidrofóbico	2-10	-	0,98	400	-
Zeólitos de peneira molecular	Polar hidrofílico, cristalino	3-10	0,20-0,50	1,4	600-700	20-25
Adsorventes poliméricos	-	4-25	0,40-0,55	-	80-700	-

Fonte: Adaptado de Seader, Henley e Roper (2010)

Sistemas dessecantes podem ser classificados em sistemas passivos e ativos. No primeiro caso, a remoção de umidade do ar úmido através de sua exposição ao dessecante é feita por correntes naturais de convecção de ar. Nos sistemas ativos, a adsorção de umidade da corrente de ar úmido a um dessecante é feita com convecção forçada (Enteria, Awbi e Yoshino, 2016).

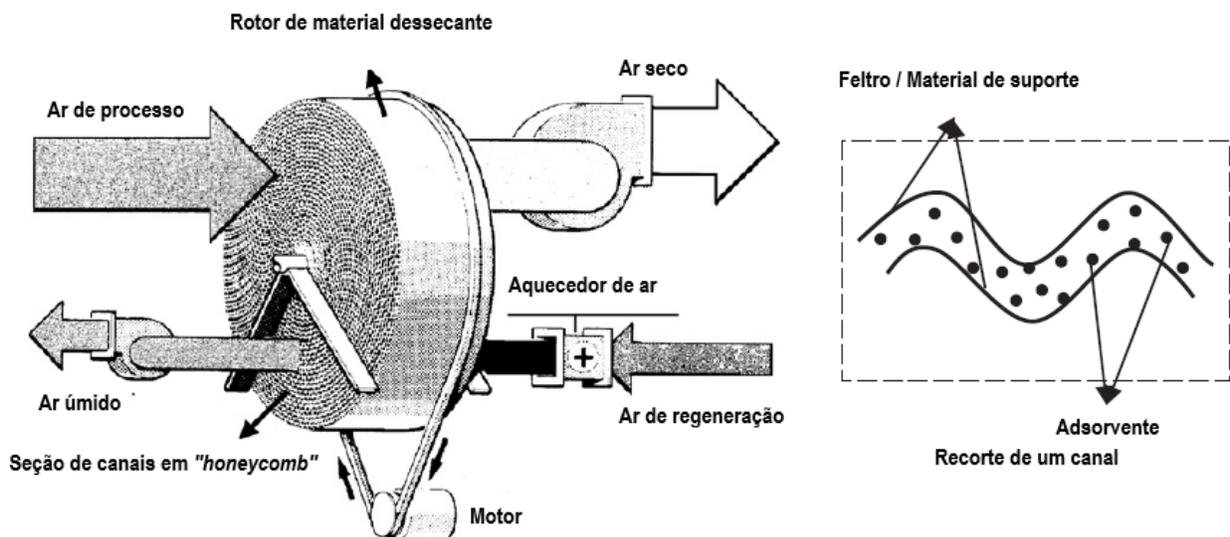
3.5.1 Roda dessecante

Todo material dessecante atrai e retém gotículas de água suspensas no ar até alcançar um equilíbrio com o ar ambiente. A umidade, à medida que é removida da corrente de ar, gradualmente diminui a diferença da umidade ambiente com a de equilíbrio na superfície do dessecante ambiente.

Para que o processo de desumidificação do ar ocorra de forma contínua, Pennington (1955) patenteou um equipamento chamado roda desumidificadora ou

dessecante. A Fig. 9 mostra uma representação esquemática de uma roda dessecante, um eixo rotativo constituído de um núcleo circular composto de milhares de microcanais (quadro direito) impregnados com material dessecante. Este equipamento possui formato de disco e possui uma separação para que dois fluxos de ar distintos: uma corrente de ar de processo atingindo, normalmente, a maior seção angular da roda para realizar a adsorção, e outro fluxo de ar de regeneração que é pré-aquecido para a dessorção. Esse arranjo fornece um ciclo de sorção por variação de pressão parcial de vapor, conforme apresentado nas seções 3.5 e 3.1.

Figura 9 - Esquemático de uma roda dessecante



Fonte: Adaptado de Ge *et al.* (2008).

Na roda dessecante (Fig. 9), o fluxo de ar de secagem ou processo transfere a umidade advinda do ambiente para o adsorbato da roda, que um ar mais seco é aquecido para o sistema, e o fluxo de ar de regeneração na temperatura entre 50°C e 140°C remove a umidade previamente adsorvida pela roda (Enteria, Awbi e Yoshino, 2017). A temperatura de regeneração depende do tipo de material adsorvente utilizado e da aplicação. A capacidade de adsorção de um dessecante é fator muito importante em um

meio dessecante, sendo caracterizada pela existência do equilíbrio termodinâmico entre a fase adsorvida, o vapor de água existente no ar e a matriz dessecante.

Kabeel, Abdelgaied (2016) mencionam que a transferência de calor e massa do ar para o dessecante é ótima na faixa de rotação entre 5 a 15 rph, dependendo da geometria da roda. Outros parâmetros que influenciam a operação de uma roda dessecante são a vazão do ar, a umidade relativa de ambos os fluxos na entrada e a temperatura do ar de regeneração (Ge, *et al.*, 2008; da Silva, de Medeiros, Gurgel, 2016). Para uma temperatura de regeneração menor, a seção de regeneração ocupar uma porção maior da roda. Rodas dessecantes comerciais normalmente adotam uma divisão de 25% regeneração/75% desumidificação para altas temperaturas de regeneração e 50% regeneração/50% desumidificação para baixas temperaturas de regeneração (da Silva, de Medeiros, Gurgel, 2016).

O desempenho de um trocador de umidade regenerativo de dessecante sólido não é somente uma função da geometria do rotor, mas também das propriedades de equilíbrio termofísico do dessecante (Stiesch, 1994; Wu *et al.*, 2018). Estas propriedades incluem as isotermas de adsorção para o vapor de água, o calor de adsorção e a capacidade térmica do sólido dessecante seco.

3.5.2 Propriedades do dessecante

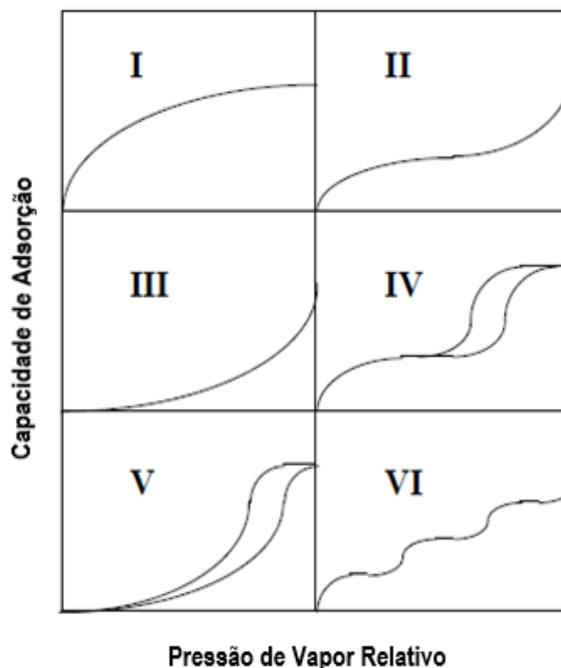
Os adsorventes são convencionalmente classificados de acordo com o diâmetro médio de seus poros internos, variando de 20 Å até 500 Å (Treybal, 1981; Pesaran e Mills, 1987; Fong e Lee, 2018). Em geral, três faixas de diâmetros diferentes são definidas, em que esses tipos de adsorventes têm diferentes características de adsorção e são estudadas e modeladas separadamente. Estes grupos são referidos como adsorventes microporosos, mesoporosos e macroporosos.

Outra propriedade característica de adsorventes é a isoterma de adsorção, que é definido como a capacidade de adsorção, a razão de massa de gás adsorvido pela

massa de adsorvente, como função da temperatura e pressão de vapor. A IUPAC, segundo Stiesch (1994), aceita a classificação de 6 diferentes isotermas de adsorção.

A Fig. 10 apresenta as seis principais classificações de isotermas de adsorção. Isotermas do Tipo I são características para adsorventes microporosos. A curva de adsorção-dessorção é reversível e a recuperação de água é governada pelo preenchimento do volume interno do poro ao invés da cobertura da área de superfície interna. A isoterma do tipo II é característica em superfícies não-porosas, adsorventes macroporosos e alguns compactados. Adsorventes que são caracterizados pelas isotermas do tipo III são sólidos não-porosos ou macroporosos, em que as forças intermoleculares entre as moléculas adsorptivas são muito maiores que as forças entre o adsorvente e o adsorptivo (Stiesch, 1994). A histerese é característica para as isotermas do tipo IV e V. Este fenômeno é tradicionalmente explicado pela ocorrência de condensação capilar dentro de poros, sendo observado em adsorventes mesoporosos. As forças intermoleculares para isotermas do tipo IV são similares aos do tipo I e II. As isotermas do tipo V são similares em natureza para o tipo III, exceto que o tamanho médio do poro é menor. Isotermas do tipo VI ilustram a adsorção gradual em multicamadas em uma superfície não-porosa ou um adsorvente macroporosa, e é similar ao isoterma do tipo II.

Figura 10 - Classificação das isotermas de adsorção



Fonte: Adaptado de Stiesch (1994)

Exemplos da classe de adsorventes tipo I são os vários tipos de carvão e sílica gel. Materiais com isotermas do tipo II são o carbono grafitizado e o compactado de sílica. Adsorventes característicos de isotermas do tipo III são polímeros, carbono grafitizado ou aerogéis de sílica. A adsorção do vapor d'água na sílica gel de baixa densidade é um exemplo do tipo IV. Como exemplo de isotermas do tipo V, tem-se as adsorções de vapores orgânicos em adsorventes mesoporosos. Isotermas do tipo VI são bastante raras, mas são encontrados na adsorção do argônio ou criptônio em carbono grafitizado em temperaturas criogênicas (Stiesch, 1994).

Atualmente, os dessecantes comercialmente disponíveis em rodas dessecantes incluem sílica gel, alumina ativada, zeólitos naturais e sintéticos, silicato de titânio, cloreto de lítio e polímeros sintéticos. A sílica gel é um dos materiais de melhor desempenho e comumente investigados em rodas dessecantes devido à sua boa estabilidade a longo prazo, histerese mínima e disponibilidade de dados na literatura para comparação e

especificação. No entanto, não é um material resistente ao calor e, portanto, é adequado apenas para baixas temperaturas de regeneração (Pesaran e Mills, 1987; Chung, 2017).

A sílica gel (SiO_2) possui uma isoterma de formato linear, que causa uma taxa de adsorção lenta e pequena capacidade de adsorção; no entanto, tem algumas características atraentes, como um calor de adsorção mais baixo (2400 kJ/kg) do que os zeólitos, o que reduz a quantidade de energia necessária para remover o calor das reações exotérmicas. Os zeólitos são uma alternativa comum ao gel de sílica, pois têm uso químico difundido e podem ser sintetizados de acordo com os requisitos da aplicação (Chung, 2017; Fong e Lee, 2018).

A roda dessecante utilizada na bancada possui como material no meio dessecante sílica gel tipo HSG (*High efficiency / Silica gel / Glass substrate*) – de alta eficiência com substrato composto por uma fibra de vidro, e zeólito molecular H4M (silicato de alumina cristalino). O microcanal do meio dessecante possui corrugações de 1,5 mm de altura por 3 mm de comprimento, com uma parede de espessura de 0,2 mm. A composição química do meio dessecante é de 82% de sílica gel, 16% de fibra de vidro e 2% de revestimento (Rotorsource, 2011).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão de trabalhos realizados de sistemas secadores construídos com análise de curvas de secagem em alimentos, com a inclusão de rodas dessecantes e acionamento solar fotovoltaico.

Chua e Chou (2003) elencaram tecnologias de secagem de baixo custo adequadas para áreas de agricultura rural, com os critérios de baixo capital inicial, facilidade de operação, e eficácia na promoção de um melhor mecanismo de secagem. Destacaram secadores de leite fluidizado, leite de jorro, infravermelho, solar, convecção simples e com dessecante. Os autores concluíram que secadores com dessecante são fáceis de se projetar, com boa autonomia de operação e facilidade de reposição. Porém, a incorporação da roda dessecante exige um fluxo de ar com temperatura maior do que a secagem ao Sol para a regeneração, sendo necessário acoplar o secador a sistemas de aquecimento do ar por aproveitamento da energia solar em localidades remotas.

Bradford *et al.* (2017) introduziram o termo “*dry chain*” para descrever a desidratação inicial de produtos duráveis a níveis que impediam o crescimento de fungos, seguido de armazenamento à prova de umidade – analogamente ao “*cold chain*” na refrigeração contínua. Os autores propuseram abordagens baseadas no clima e no sistema de secagem para minimizar o acúmulo de micotoxinas e infestações de insetos em produtos secos, reduzir a perda de alimentos, melhorar a qualidade dos alimentos, segurança e proteção, e proteger a saúde pública. Durante revisão, destacaram a secagem dessecante de processos adaptados a baixas temperaturas para alimentos especiais que reduzem a possibilidade de contaminação sem danos a estrutura do produto.

Entre sistemas experimentais de secagem com levantamento de curvas, a revisão é iniciada com Freire (1999), que construiu a bancada experimental de secagem de amostras que foi reformada no presente trabalho para incluir a roda dessecante. O autor apresentou o projeto, os detalhes construtivos e o funcionamento de uma bancada experimental para o levantamento de curvas de secagem de alimentos. Seu arranjo

permitiu a medição instantânea do peso, da temperatura de bulbo seco e da umidade relativa do fluxo de ar que era usada na secagem de alimento por convecção forçada com uma corrente de ar previamente aquecida. Freire apresentou quatro curvas de secagem, sendo duas realizadas em frutos (banana e maçã) e duas em peixes (carpa e tambaqui). Para amostras de maçã, o autor encontrou as respectivas taxas de secagem de $0,0486 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{cm}^2)$ para um fluxo de ar de secagem com temperatura de $71,5^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $10,7\%$. Analogamente para bananas, Freire (1999) encontrou $0,0499 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{cm}^2)$ nas condições de temperatura de 50°C e umidade relativa de $16,1\%$.

Para a secagem de peixes, Freire *et al.*, 2003, apresentaram uma análise das taxas de secagem de amostras de filé de peixe carpa (*Cyprinus carpa*), tambaqui (*Colossoma macropomum*) e tilápia nilótica (*Oreochromis niloticus*), em que, para as condições medidas de 62°C e 10% de umidade relativa para $57,6 \text{ cm}^2$ de área de secagem, a amostra de carne de carpa atingiu a umidade de equilíbrio em 350 minutos e a de tambaqui em 400 minutos, alcançando taxas de remoção de umidade de $0,039$, $0,024$ e $0,036 \text{ g}/\text{h}\cdot\text{cm}^2$ para a carpa, tambaqui e tilápia, respectivamente. Souza (2017) readequou o projeto original de Freire (1999) em termos de sensores, balança e placa de aquisição mais modernos, adicionando o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos isolado e conectado à rede para a bancada.

Ebuy (2007) apresentou uma simulação numérica do desempenho de um sistema de secagem solar para grãos agrícolas através do software TRNSYS®. O sistema era composto por um coletor solar de placa plana de 2 m^2 , por dados meteorológicos de Adis Abeba, Etiópia, e por uma câmara de secagem. A simulação produziu temperaturas de 14 a 28°C (das 8h30 às 16h) mais altas que a temperatura do ar ambiente em um dia claro. O teor de umidade dos cereais simulados reduziu do nível inicial entre 16% a 30% em base úmida até o teor final de 10 a 12% após cerca de 14 horas de sol.

Tzempelikos *et al.* (2013) projetaram um secador convectivo, com câmara de secagem de fluxo vertical, trocador de calor, evaporador e sistema de ventilação centrífuga controlada. Este secador permitia a operação em modos de ciclo aberto ou fechado por defletores manualmente controlados. O monitoramento da desumidificação de produtos agrícolas era feito através de células de carga nas bandejas do secador,

sensores de temperatura, de umidade relativa, de velocidade e pressão dinâmica do ar. Para o teste apresentado, marmelos frescos fatiados em 10mm de espessura foram usados como amostras. O teor de umidade da amostra foi reduzido de 4,27 $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sól.seco}}$ (base seca) em uma câmara com ar de secagem a 60°C, 4% de umidade relativa e 2 m/s, até entrar em equilíbrio com o ar com um teor de umidade da amostra de 0,085 $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sól.seco}}$ em 12 horas de secagem.

Yahya *et al.* (2016) compararam o desempenho de um secador solar e um segundo secador de bomba de calor assistida por energia solar para a secagem de tiras de mandioca. O secador solar era composto por dois coletores solares em série, um soprador e uma câmara de secagem. Já o segundo secador usava um circuito de bomba de calor para pré-aquecer o ar na saída do soprador. No levantamento das curvas de secagem, o secador solar e o assistido com bomba térmica reduziram a massa de mandioca de 30,8 kg para 17,4 kg - e o teor de umidade da mandioca de 61% (base úmida) para 10,5% - através do ar de secagem com vazão mássica de 0,124 kg/s. Os resultados encontrados estão disponíveis na Tab. 2. A comparação mostrou que o secador solar assistido por bomba térmica teve uma cinética de secagem mais eficiente com um leve aumento da temperatura média, desta forma, apresentando maior eficiência térmica e taxa específica de extração de umidade, porém com menor fração solar média.

Tabela 2 – Comparativo dos resultados dos parâmetros encontrados na secagem realizada por Yahya *et al.* (2016).

Parâmetro	Secador solar	Secador solar assistido por bomba térmica
Tempo (horas)	13	9
Temperatura média da câmara (°C)	40	45
Taxa de secagem (kg/h)	1,33	1,93
Taxa específica de extração de umidade (kg/kWh)	0,38	0,47
Eficiência térmica média (%)	25,6	30,9
Eficiência média de recuperação (%)	39,3	43,6
Fração solar média (%)	66,7	44,6

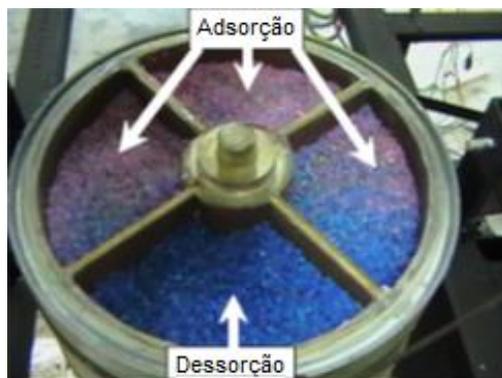
Fonte: Adaptado de Yahya *et al.* (2016).

4.1 Sistemas com roda dessecante para secagem

Um sistema de secagem de alimentos de baixa temperatura com fluxo de ar controlado e temperatura foi apresentado por Nagaya *et al.* (2006). A configuração consistia em um sistema de controle de umidade do ar, através de roda dessecante, transdutores térmicos, potenciômetros lineares, com controle por algoritmo de retroalimentação da velocidade do ar de secagem, através de um ventilador com vazão máxima de 50 m³/h; e da temperatura, por meio de um aquecedor com 1350W de potência máxima. Através da avaliação experimental do sistema, foi demonstrado que vegetais secos produzidos por este método conservaram sua cor fresca e mantiveram um teor de vitamina C 3 vezes maior do que outros processos.

Madhiyanon *et al.* (2007) desenvolveram um sistema de secagem a ar quente integrado com uma roda dessecante projetada para secar pedaços de coco - Fig. 11. O secador consistia em dois circuitos de ar: o primeiro circuito de ar secava o produto e operava nos modos de sistema fechado ou parcialmente aberto e o segundo circuito de ar regenerava o dessecante, com o complemento de sopradores e aquecedores elétricos. Os experimentos realizados obtiveram uma temperatura do ar de secagem entre 50 e 60 °C – sob constante temperatura de regeneração de 100 °C, velocidade do ar de 0,70 m/s e umidade relativa controlada entre 26 e 30% na câmara de secagem. Os autores verificaram que o tempo de secagem do sistema integrado foi reduzido em cerca de 25% em comparação com o sistema de ar quente fechado, secando a amostra com teor inicial de umidade de 140% (base seca) para 10% em 240 minutos.

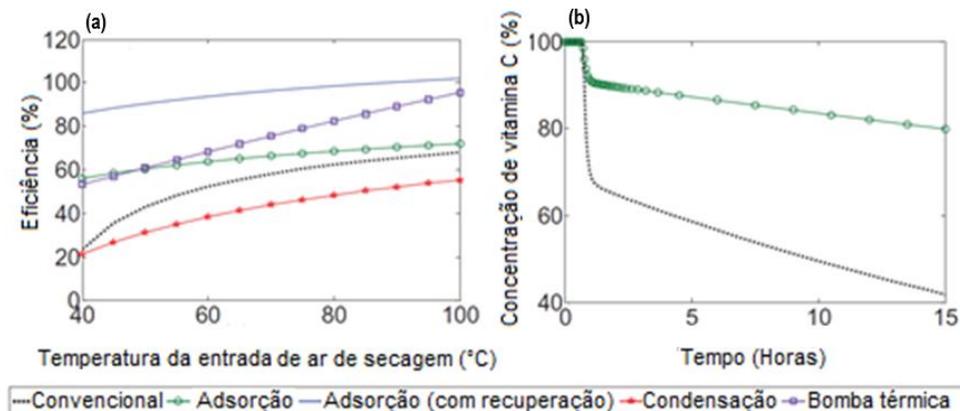
Figura 11 – Detalhe da roda dessecante artesanal com compartimento de grãos de sílica gel soltos.



Fonte: Adaptado de Madhiyanon *et al.* (2007)

Atonwu *et al.* (2011) avaliaram a eficiência energética da secagem com dessecante em relação às técnicas de secagem convencional, por condensação e por bomba de calor – Fig. 12. Os autores desenvolveram modelos matemáticos, nos quais as eficiências de energia de diferentes tipos de secador dessecantes foram expressas em termos de um secador convectivo convencional operando nas mesmas condições termodinâmicas. Os resultados mostraram a maior eficiência energética em secadores desumidificadores em um ar de entrada do secador de 5 g/kg, em comparação com um secador convencional a 10 g/kg – Fig. 12 (a). Neste gráfico, uma eficiência acima de 80% já na temperatura de 40°C foi alcançada pelo secador de adsorção com recuperação, chegando a mais de 90% na faixa de 100°C – estando um pouco acima do secador com bomba de calor. Na A Fig. (b), a degradação da vitamina C foi simulada para a curva de secagem da abóbora, mostrando que para a mesma energia consumida, a degradação da vitamina C foi reduzida usando secadores com dessecantes.

Figura 12 – (a) Eficiência energética para diferentes tipos de secadores. (b) Degradação de vitamina C para a secagem com e sem desumidificação do ar, ambas a uma eficiência energética de 60%.



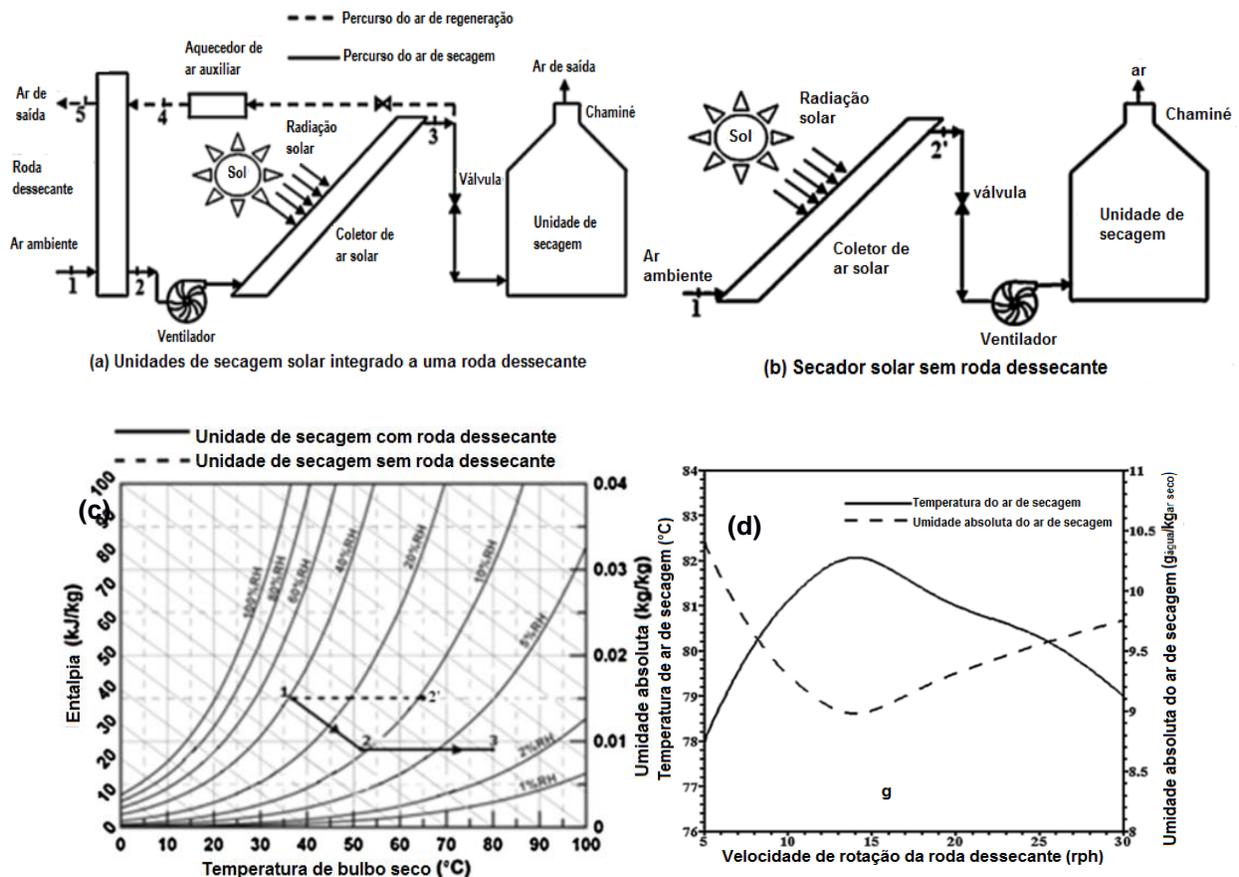
Fonte: Adaptado de Atuonwu *et al.* (2011).

Misha *et al.*, (2015 e 2016), avaliaram um secador com dessecante sólido acionado por energia solar nas secagens da fibra da semente de hibisco e das folhas de palmeira trituradas, feitas em dias de baixa radiação solar para determinação da eficiência no período do ano de menor incidência, e comparadas com a secagem ao sol. O tempo de secagem do primeiro estudo foi reduzido em 24%, de 20,75 h para 15,75 h, em comparação com a secagem aberta ao Sol, pois o processo continuava mesmo na ausência de luz do sol. No segundo trabalho, o tempo de secagem para reduzir o teor de umidade das folhas de palmeira moídas, de 69% para 29% (base úmida), nas bandejas da câmara de secagem foi, em média, 47% menor no sistema com dessecante em relação à secagem aberta ao Sol.

Kabeel e Abdelgaied (2016) investigaram o efeito da roda dessecante, (Fig. 13 (a)), no desempenho térmico de uma bancada de secagem solar durante o dia. O sistema consistia de um coletor plano, um soprador e uma câmara de secagem com um aquecedor auxiliar – Fig. 13. Os resultados mostraram que o uso da roda dessecante aumentava a temperatura do ar de 65°C para 82°C e decrescia a umidade absoluta do ar de 15g/kg de ar para 8,8g/kg – Fig. 13 (c), quando comparado a um secador solar

indireto (Fig. 13 (b)) sob as mesmas condições. O aumento de calor útil da unidade de roda dessecante se tornou, em média, 153% maior do que o modelo convencional, sob a rotação ótima obtida do componente de 15 rph – Fig. 13 (d).

Figura 13 - Diagrama esquemático do secador com (a) e sem roda dessecante (b), seus estados termodinâmicos (c) e curvas de desempenho (d).



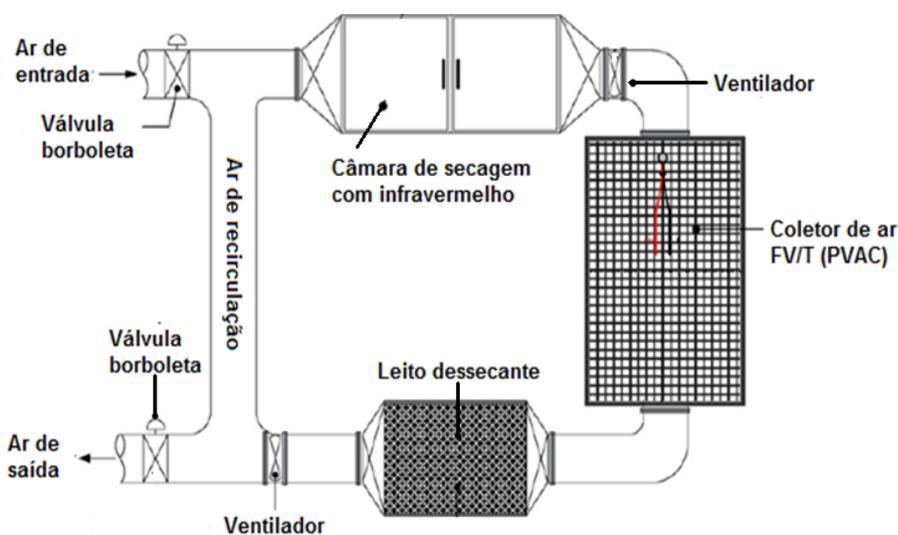
Fonte: Adaptado de Kabeel e Abdegaied (2016).

4.2 Sistemas com geração de energia solar fotovoltaica

Punlek et al. (2009) projetaram e conduziram experiências em um sistema de secagem solar, que consistia principalmente na combinação de um coletor solar para

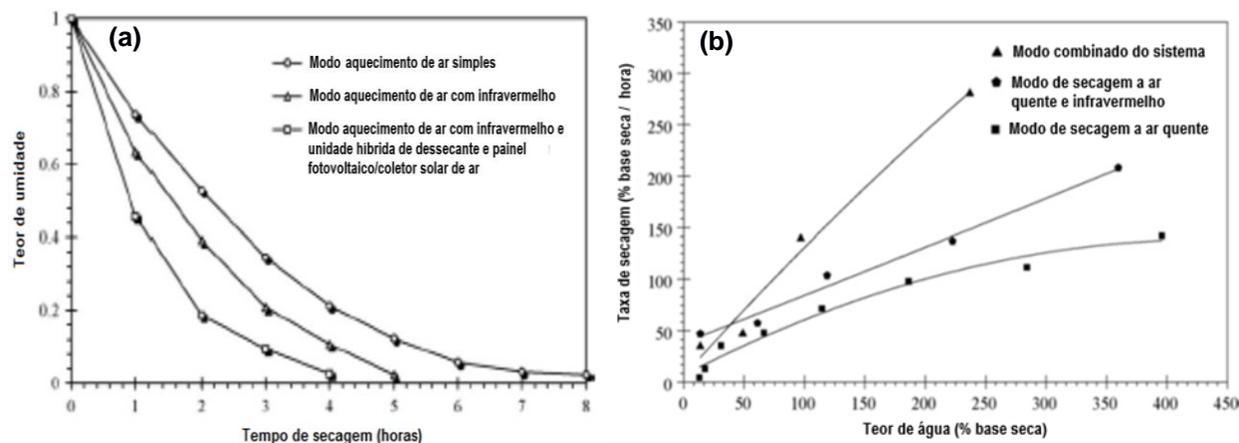
aquecimento de ar com uma seção da placa composta por células FV para acionar a ventilação, um leito dessecante de sílica gel, e uma câmara de secagem com radiação infravermelha – Fig. 14. O secador possibilitava a operação em três modos: modo de aquecimento térmico do ar, modo aquecimento por infravermelho do ar e modo híbrido. Testes de secagem em fatias de gengibre, sob uma temperatura de 60 °C e uma vazão mássica de 0,022 kg/s reduziram o teor de umidade da amostra de 540% (base seca) para 13% em 4 horas no modo combinado, 5 horas na secagem com infravermelho e 8 horas na secagem só com o coletor solar de ar – Fig. 15 (a). A curva da taxa de secagem é apresentada na Fig. 15 (b).

Figura 14 - Diagrama esquemático do secador com leito dessecante e módulo fotovoltaico integrado a um coletor solar térmico de ar.



Fonte: Adaptado de Punlek *et al.* (2009).

Figura 15 – (a) Variação do teor de umidade de amostras de gengibre durante o tempo de secagem e (b) curva da taxa de secagem em relação ao teor de umidade.



Fonte: Adaptado de Punlek *et al.* (2009)

Um sistema de secagem do tipo estufa solar, integrado a uma série de coletores solares de ar contendo placas fotovoltaicas, foi proposto por S. Tiwari e G. Tiwari (2017). Os autores avaliaram parâmetros de energias térmica e elétrica, além das eficiências térmicas e exergéticas - calculadas para o sistema com ajuda de diferentes temperaturas, para condições climáticas de Nova Délhi, Índia. Foi desenvolvida uma modelagem do sistema considerando diferentes variáveis, como temperatura das culturas, estufa e célula solar. Os autores validaram resultados numéricos no *software* MATLAB® com valores experimentais, desenvolvendo assim curvas características para secagem e eficiência. Valores teóricos e experimentais da energia térmica total foram 1,92 kWh e 2,03 kWh, respectivamente, com boa concordância.

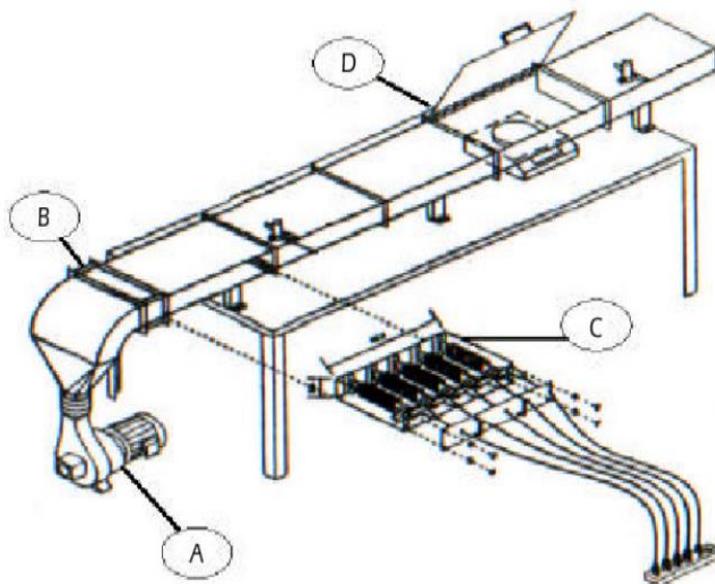
5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta as etapas de concepção do projeto da bancada experimental de secagem com roda dessecante e regeneração por resistências elétricas, seleção da roda dessecante, escolha e instalação do banco de resistências, coleta de dados, preparação e medição da amostra e dimensionamento do sistema fotovoltaico para alimentação da bancada.

5.1 Bancada experimental de secagem com roda dessecante e regeneração por resistências elétricas

A bancada experimental de secagem com roda dessecante foi projetada tendo como ponto de partida o trabalho realizado por Freire (1999). A bancada (Fig. 16) tinha sido desenvolvida para realizar o levantamento da curva de secagem de amostras (D) através do aquecimento do ar por um banco de resistências (C). Os dutos de ar foram fabricados com chapa de zinco galvanizado com espessura de 1,3 mm, revestido por um isolante térmico de 10 mm de espessura. A área de seção transversal interna era de 29 cm de largura e 9 cm de altura. O sistema continha um defletor mecânico (B) para controlar o fluxo de ar na saída do ventilador (ar de secagem).

Figura 16 - Diagrama da bancada experimental de secagem com aquecimento de ar por resistências elétricas



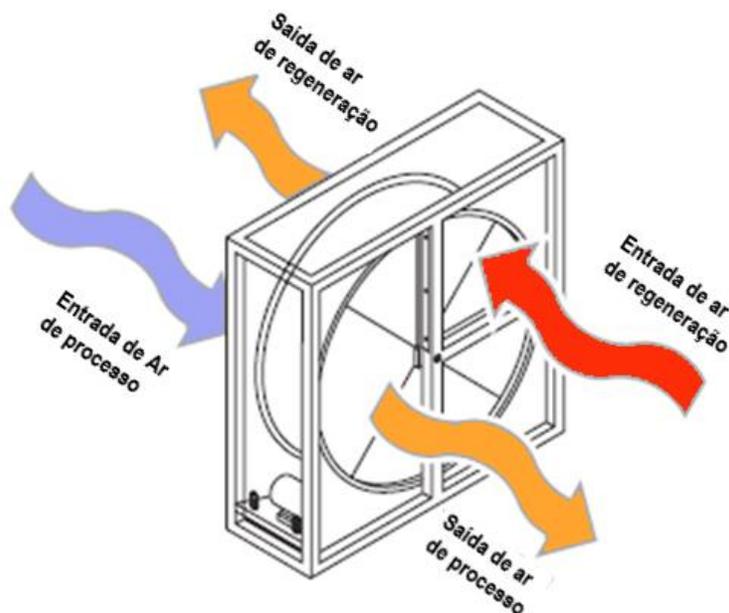
A – ventilador de ar de secagem	B – controlador de vazão (defletor)
C – resistências elétricas de aquecimento	D – balança com amostra

Fonte: Freire (1999).

O objetivo principal da reforma da bancada experimental foi de incluir uma roda dessecante para condicionar o ar de secagem, absorvendo parte de sua umidade e simultaneamente aumentando sua temperatura de bulbo seco. Na bancada com roda dessecante, são necessários dois fluxos de ar, sendo um de processo e outro de regeneração.

No fluxo de processo, o ar diminui sua umidade relativa e aumenta sua temperatura de bulbo seco. No fluxo de regeneração, o ar aquecido nas resistências elétricas retira umidade da roda e diminui sua temperatura de bulbo seco. Os fluxos de processo e de regeneração na roda estão mostrados na Fig. 17, em sentido contrário, que é o sentido mais eficiente do que os fluxos paralelos.

Figura 17 - Fluxos de ar de processo e de regeneração na roda dessecante



Fonte: Adaptado de *Rotorsource* (2011).

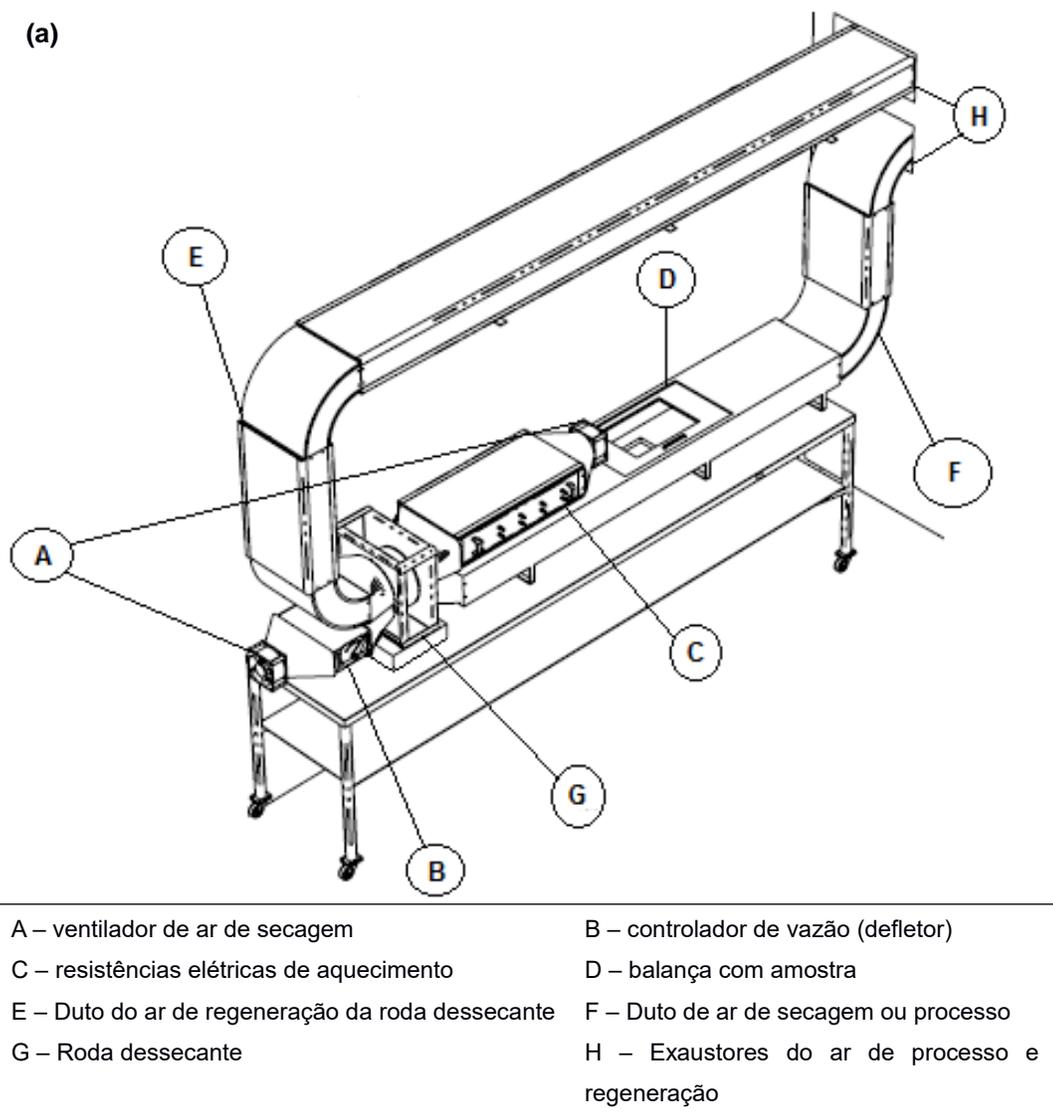
Para a bancada de secagem com roda dessecante (Fig. 18), o duto de ar de processo foi rearranjado em quatro partes:

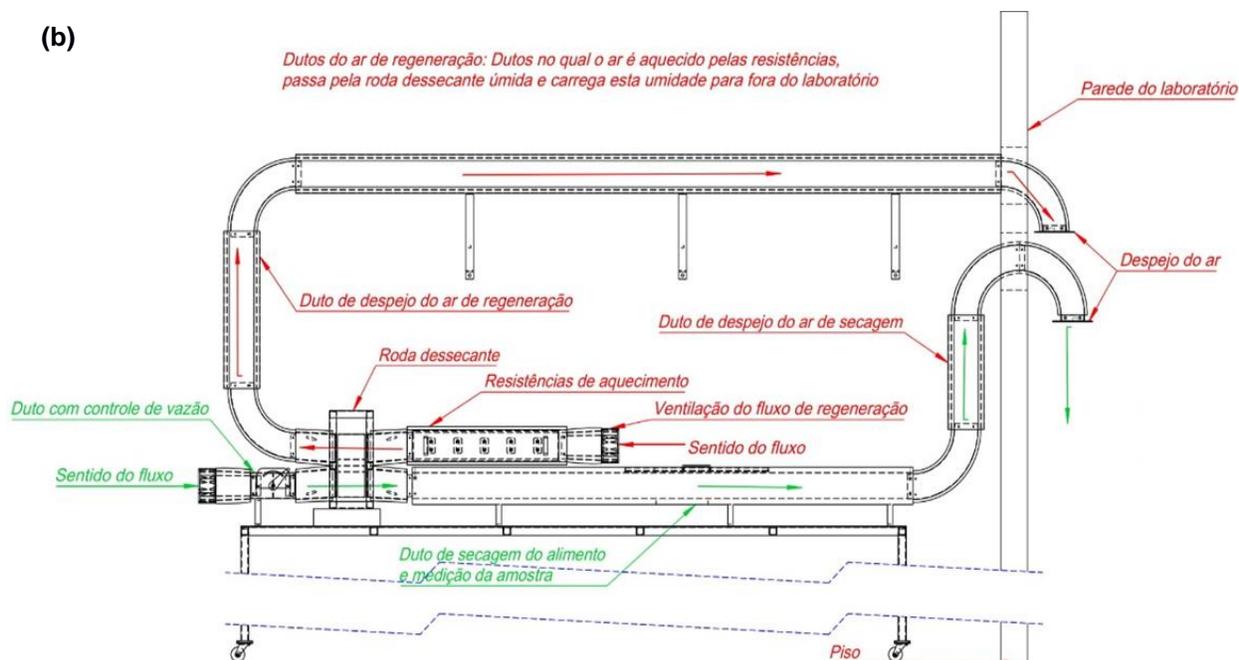
- i. o duto curvado após a boca do ventilador (A) da bancada de Freire (1999) foi retirado para compor o desvio do ar de exaustão;
- ii. a seção do defletor mecânico (B) foi encaixado no novo ventilador na entrada de ar de desumidificação;
- iii. o duto com a gaveta de resistências de aquecimento (C) foi separado para formar o duto de entrada de ar de regeneração com um ventilador adicional para secagem e,
- iv. a seção da balança (D) do duto de secagem foi aproveitada em um encaixe no início da seção, acoplado à roda dessecante para o ar desumidificado.

Para finalizar a descrição da nova configuração da bancada, foram fabricados novos dutos para compor as entradas de ar de secagem (F) e regeneração (E) com o

encaixe dos novos ventiladores, como mostra o diagrama esquemático apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Posicionamento da bancada experimental de secagem dessecante





Fonte. Autor.

A fim de que os fluxos de ar aquecidos acima da temperatura ambiente não influenciassem os processos experimentais, foi necessário que esses dutos atravessassem a parede externa do laboratório para exaustão desses fluxos de ar (Fig. 28 (b)). Desenhos assistidos por computador (CAD, *Computer Aided Design*) com mais detalhes construtivos da bancada experimental estão apresentados no Apêndice A.

No novo arranjo, o duto de ar de processo (F) da bancada contém os seguintes componentes: soprador (A), duto defletor ou controlador de vazão (B), roda dessecante (G), duto com balança de medição de secagem da amostra (D) e tubulação de exaustão.

O duto de regeneração (E) foi montado acima do canal de processo, no sentido contrário para o melhor desempenho da roda dessecante (contrafluxo de ar), com um revestimento especial de lã de rocha sobre a região das resistências e duplo revestimento entre os dois fluxos para que o aquecimento não interfira na condução de calor nem no manuseio da amostra. A ordem dos componentes do duto de regeneração conforme circulação de ar é: soprador (A), banco de resistências (C), roda dessecante (G) e tubulação de exaustão (H).

5.2 Seleção da Roda Dessecante

Os critérios de seleção utilizados na escolha da roda dessecante foram as dimensões geométricas e a vazão mássica, determinadas a partir da vazão volumétrica para as condições termodinâmicas (temperatura de bulbo seco e umidade relativa) dos fluxos de ar.

O conjunto da roda é composto por um invólucro metálico, com dimensões externas de 342,9 x 342,9 x 231,9 mm, que abrange um rotor de matriz dessecante de sílica gel, com diâmetro de 220 mm e 100 mm de profundidade, um motor de baixa rotação, de 12 rotações por hora, e um sistema de tensionamento da correia por uma mola do tipo braço articulado. Os detalhes das dimensões são apresentados na Fig. 19.

Figura 19 – Fotografia da roda dessecante



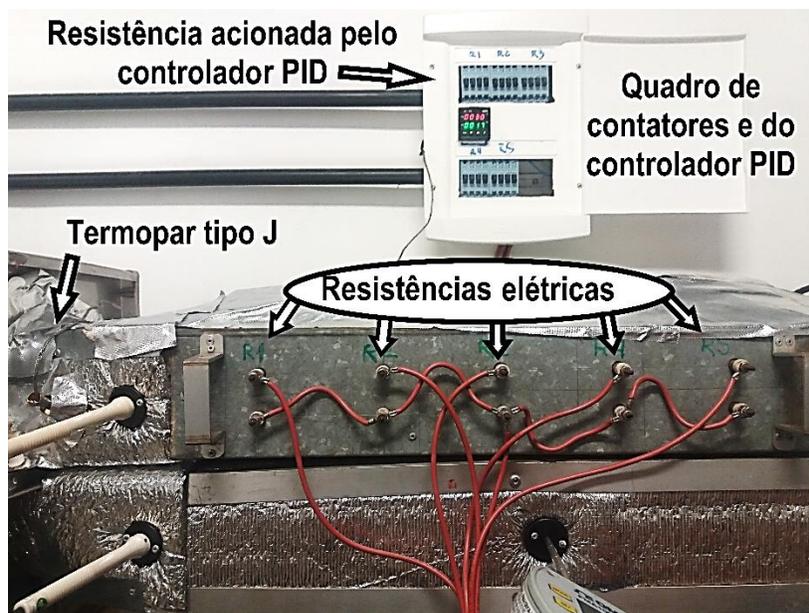
Fonte: Autor.

Os ventiladores axiais escolhidos têm vazão mássica de 0,052 kg/s e bocal de ventilação com diâmetro de 110 mm. Os detalhes dos ventiladores são demonstrados no Anexo B.

5.3 Escolha e instalação do banco de resistências elétricas e controlador de temperatura

O banco de resistências elétricas responsável pelo aquecimento do ar de regeneração da roda dessecante é composto por cinco resistências elétricas de aquecimento aletadas, blindadas, em tubo de aço inox AISI 304 com 9 mm de diâmetro e 1000W de potência cada, podendo chegar a uma temperatura máxima superficial de 400 °C (Anexo C). O acionamento elétrico das resistências foi feito separadamente, para que o valor da temperatura do ar de regeneração na entrada da roda pudesse ser controlado.

Figura 20 – Banco de resistências elétricas aletadas e a ligação elétrica a partir dos contadores e o controlador de temperatura



Fonte: Autor.

O controle de temperatura do ar de regeneração operou através de uma resistência elétrica do banco, que foi acionada automaticamente por um circuito eletrônico conectado a um termopar tipo J no duto de ar (Fig. 20), e regulada conforme faixa de temperatura programada. Este circuito temporizou o acionamento da resistência e estabiliza com um comando de sintonia automática de parâmetros de controle proporcional integral derivativo (PID).

O controle PID é uma técnica de minimização de erro em um processo, neste caso, a manutenção da temperatura de trabalho definida pelo operador da bancada. Este controle foi realizado conforme o tempo de acionamento ou desligamento da resistência afeta a variação de temperatura lida pelo termopar, assimilado após o período de sintonia. As outras resistências foram acionadas manualmente, com curva de sinal em degrau.

5.4 Coleta de Dados

Esta seção apresenta o detalhamento dos equipamentos e sensores de medição junto do processo de aquisição de dados para o levantamento de curvas de secagem, com base no trabalho de Souza (2017).

O processo de secagem com dessecante impõe mudanças de temperatura e umidade dos fluxos de ar nas entradas e saídas nos dutos de desumidificação e regeneração da roda dessecante. Simultaneamente, ocorre a desidratação do alimento em contato com o ar fluindo sobre a amostra, com transferência de calor e massa. Para montar a base de dados, foi preciso medir os estados termodinâmicos do ar ao longo dos dutos da bancada e criar um procedimento de coleta instantânea, com intervalos de medição definidos pelo usuário.

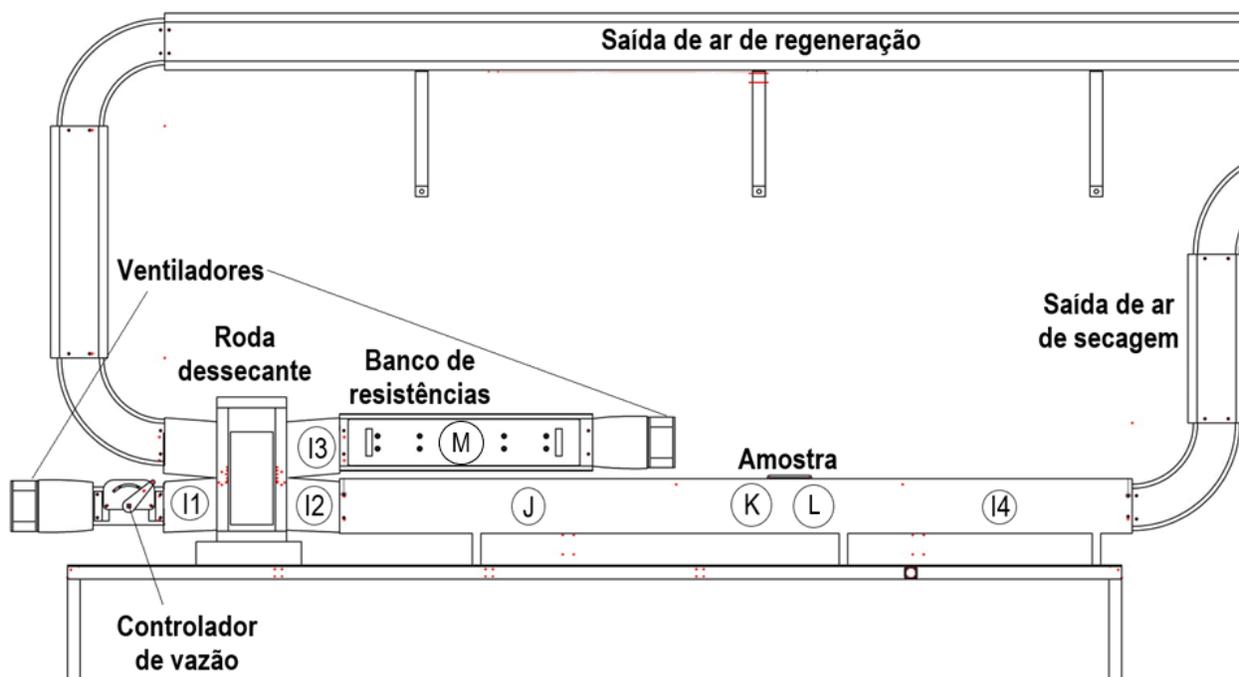
As propriedades necessárias para identificar os estados termodinâmicos do ar e do processo de secagem foram a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa, além

da velocidade do ar e a massa da amostra. À exceção da massa da amostra, todas as medições foram feitas nos fluxos de ar, com sensores atravessando a parede lateral do duto. Os flanges de encaixe dos sensores foram impressos em 3D, nas mesmas dimensões do diâmetro das sondas, de modo a impedir o vazamento de ar. Os detalhes construtivos estão presentes no Apêndice A.

Os pontos de medição da temperatura e umidade relativa do ar necessários para o levantamento de curvas de secagem foram registrados e armazenados individualmente. As temperaturas de bulbo seco e de ponto de orvalho foram medidas por um sensor conectado ao registrador. Este sensor foi posicionado próximo à balança semianalítica para o acompanhamento da temperatura e umidade do ar antes do alimento. O Anexo C apresenta o catálogo dos componentes de medição. Esses instrumentos foram conectados por meio de portas seriais DB9, possibilitando o monitoramento em tela da temperatura, umidade relativa e ponto de orvalho, e permitindo o armazenamento em computador por meio de um cabo RJ45 (Ethernet). Foi possível fazer o acompanhamento tanto por *software*, que permitia a configuração interna do registrador, quanto pelo modelo de planilha eletrônica habilitada para macros, disponibilizado pelo fornecedor para a leitura. Um cabo em formato de Y possibilitava a junção de duas sondas em um único registrador.

Quatro sondas foram inseridas nas seguintes localidades da bancada (Fig. 21): (a) na entrada dos dutos de processo e regeneração (medição do ar ambiente); (b) após o banco de resistências elétricas de aquecimento; (c) após as seções de desumidificação e regeneração da roda dessecante; (d) após a amostra de secagem.

Figura 21 - Posicionamento dos instrumentos de medição da bancada experimental de secagem dessecante



I1, I2, I3, I4 – Sensor de temperatura e umidade do ar. J – Sensor de temperatura e velocidade do ar.
 K – Balança semianalítica. L – Termopar de penetração e coletor de dados.
 M – Sensor de corrente alternada não-invasivo.

Fonte: Autor.

A Fig. 22 mostra o posicionamento dos sensores de medição. A medição da velocidade e temperatura do ar foi feita com um anemômetro por meio de um elemento de termorresistência de 100 ohms para medição de velocidade e dois elementos de termorresistência de 1000 ohms para medição de temperatura, que foi instalado no duto de desumidificação após a roda dessecante e antes da amostra. O registrador tem uma faixa de medição de velocidade de zero até 6,09 m/s e apresenta leitura de temperatura e velocidade do ar, interface serial com computador por *software*. O Apêndice C mostra a programação feita para captar a leitura obtida no cabo USB deste sensor para ser lido em conjunto à planilha habilitada para macros. O Anexo C apresenta o catálogo desse sensor.

Figura 22 – Localização dos sensores na bancada



Fonte: Autor.

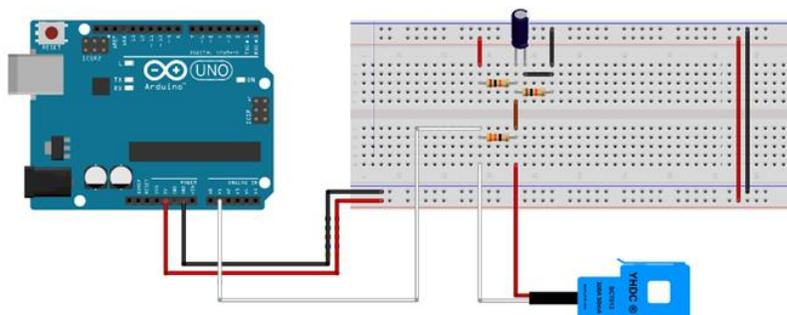
Para a medição instantânea de massa da amostra, foi selecionado uma balança semianalítica, com capacidade de 6200 gramas, resolução mínima de 0,01 gramas e tempo de resposta entre 1,5 e 2,5 segundos. É composta por um prato com 180 mm de comprimento por 170 mm de largura. A coleta de dados da massa da amostra foi feita através da conexão da porta RS-232C/DB9 da balança para a porta USB do computador, com a captação do registro de massa através da comunicação *Hyperterminal* por protocolo de entrada USB similar ao sensor anemômetro. O Apêndice C mostra a programação feita para captar a leitura obtida no cabo USB da balança para ser lido

simultaneamente aos outros sensores. O Anexo C contém o catálogo da balança semianalítica.

Para complementar o monitoramento da amostra, foi implantado um termopar de penetração, do tipo T, dentro do alimento. As leituras foram gravadas por um coletor de dados, com leitura a cada 10 segundos para se adequar à aquisição dos outros sensores. Os dados eram armazenados em um cartão SD e posteriormente adicionados à planilha de dados. O anexo C contém os catálogos do termopar e do registrador.

A medição do consumo de energia das resistências elétricas com o controlador PID de temperatura foi realizada com uma placa Arduino Nano v3.0 para receber a leitura de dados de um sensor de corrente alternada não-invasivo, com 100A de corrente máxima lida. Para converter a saída de corrente elétrica para níveis de tensão, foi montado um resistor de carga (Fig. 23), com um capacitor de 10 μF e três resistores formando um divisor de tensão, sendo dois com 10 $\text{k}\Omega$ e um com 330 Ω .

Figura 23 – Esquema de ligação do sensor de corrente não-invasiva à placa Arduino.



Fonte: Autor.

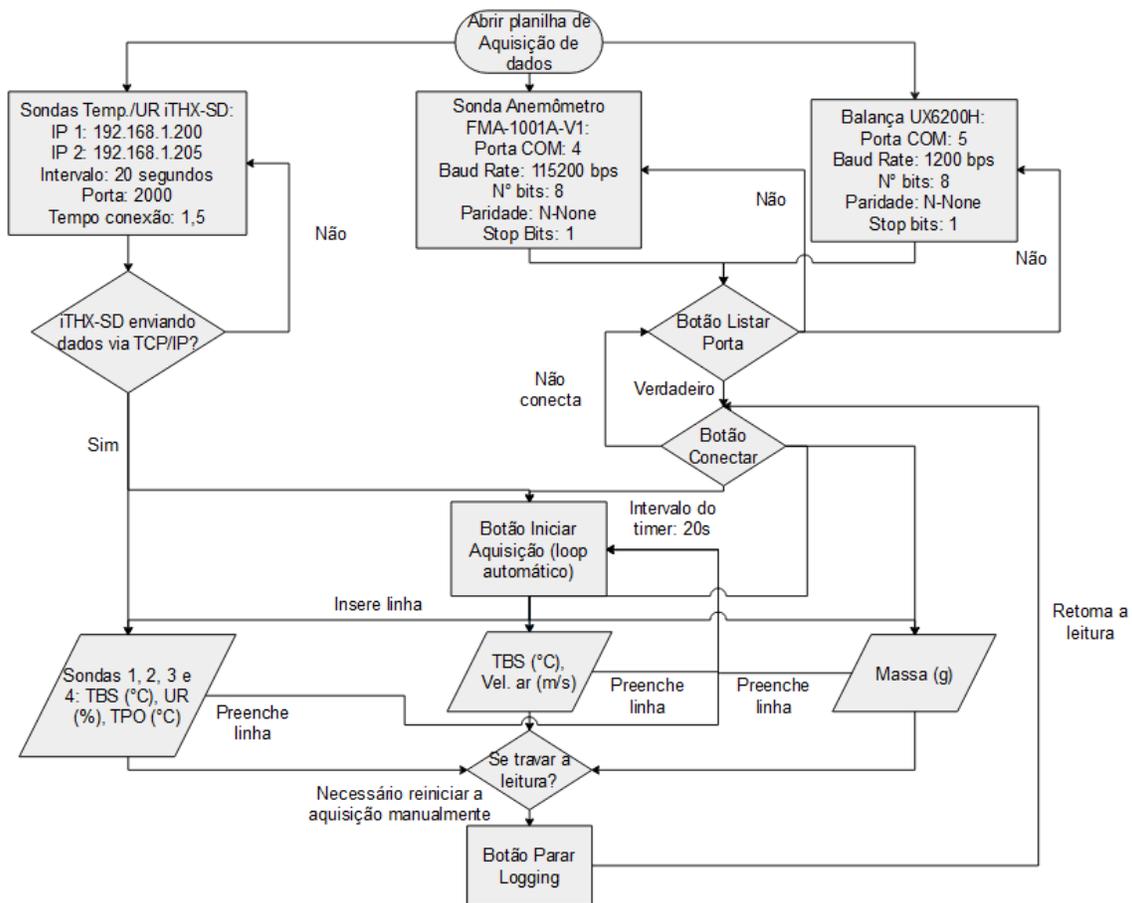
O Apêndice D apresenta a programação necessária para a aquisição da leitura de corrente, feita para o *software* de programação da placa, que criou uma interface de retorno de comando em seu *Monitor Serial*. Para registrar o comando de acionamento/desligamento do controlador PID de temperatura, uma medição foi feita a cada segundo e gravada ao longo de todo o processo de secagem com a hora para ser

sincronizada com a aquisição de dados da planilha. Assim, o tempo de acionamento das resistências foi determinado, necessário tanto para a determinação do consumo de energia da bancada, quanto para o dimensionamento do sistema fotovoltaico.

Todos os registros dos sensores foram armazenados em um computador para elaboração das curvas de secagem. Para unificar a leitura de dados envolvendo estes três tipos de sensores (de temperatura e umidade relativa, temperatura e velocidade do ar e a balança), foi adaptada na planilha habilitada para macros a aquisição de dados simultânea das seis sondas na bancada através da duplicação do poder de leitura dos sensores de temperatura e umidade relativa na comunicação por protocolo *TCP/IP* (protocolo de controle de transmissão e de *Internet*) do cabo *Ethernet* (cabo de rede convencional RJ-45) através de um roteador de portas de rede local LAN (*local area network*), além da programação da comunicação serial *USB* por protocolo *API* (*Application Programming Interface* ou Interface de Programação de Aplicações) para operações *I/O* (*Input/Output* ou entrada e saída de dados).

Os detalhes de operação e de dimensão dos equipamentos de medição estão apresentados no anexo C. O fluxograma de conexão e aquisição de dados dos sensores supracitados é apresentado na Fig. 24.

Figura 24 – Fluxograma do algoritmo de aquisição de dados na planilha Excel.



Fonte: Autor.

A Fig. 25 mostra um exemplo da planilha com o registro de dados.

Figura 25 – Planilha de aquisição de dados dos instrumentos da bancada experimental de secagem dessecante.

Linha	491	Hora da última leitura		Tempo de secagem			IP 1		IP 2						
		17:52:33		02:44:27			192.168.1.200		192.168.1.205						
Sonda iTHX-SD 1 (Ent. Des.)		Sonda iTHX-SD 2 (Saída Roda)			Sonda iTHX-SD 3 (Ent. Reg.)			Sonda iTHX-SD 4 (Após Amostra)			FMA 1001A-V1		UX6200H		
Hora	TBS (°C)	φ (%)	TPO (°C)	TBS (°C)	φ (%)	TPO (°C)	TBS (°C)	φ (%)	TPO (°C)	TBS (°C)	RH 2	TPO (°C)	TBS (°C)	VAr (m/s)	Massa (g)
15:08:06	25,70	66,10	18,80	57,70	14,50	21,60	101,90	15,60	56,60	45,20	13,00	10,30	67,44	0,21	9,01
15:08:26	25,70	66,10	18,80	57,70	14,40	21,50	101,60	15,60	56,40	45,70	12,60	10,20	67,61	0,12	9,27
15:08:46	25,70	65,90	18,80	57,80	14,20	21,40	101,40	15,60	56,30	46,30	12,00	10,00	67,61	0,30	9,09
15:09:07	25,70	66,10	18,80	57,80	14,20	21,40	101,30	15,60	56,20	46,80	11,90	10,20	67,50	0,14	8,98
15:09:27	25,70	66,20	18,90	57,80	14,20	21,40	101,30	15,60	56,20	47,30	11,80	10,50	67,61	0,22	8,77
15:09:48	25,70	66,20	18,90	57,90	14,20	21,50	101,20	15,60	56,10	47,60	11,60	10,40	67,28	0,27	
15:10:08	25,70	66,20	18,90	57,90	14,30	21,60	101,10	15,60	56,00	47,90	11,80	10,90	67,11	0,33	8,96
15:10:28	25,70	66,30	18,90	58,00	14,20	21,50	101,00	15,70	56,10	48,30	11,70	11,10	67,17	0,19	8,95

Fonte: Autor.

5.5 Preparação e medição da amostra

As amostras de frutas utilizadas por Freire (1999) foram escolhidas como objeto de comparação entre as bancadas. As amostras foram fatias de maçã argentina (*Malus domestica Borkh*) e de banana prata (*Musa acuminata*). Elas foram cortadas com as mesmas espessuras médias do experimento de Freire, 3 mm para maçã e 4 mm para banana. Na realização dos experimentos, os valores da balança eram lidos a cada 20 segundos e as médias dos valores medidos eram armazenados em intervalos de 5 minutos para as fatias de maçã e de 2 minutos para fatias de banana.

Para fins de comparação dos processos com roda dessecante e aquecimento sensível, as amostras de maçã e banana foram secadas nas mesmas temperaturas de Freire, a saber, 71,5 °C e 50 °C, respectivamente.

As temperaturas medidas do ar de secagem na bancada de Freire (1999) foram, em média, de 71,5 °C nos experimentos com amostras de maçãs. Já na secagem de fatias de bananas, a média das medições de temperatura do ar aquecido pelo grupo de resistências foi de 50 °C. A razão para a escolha destes níveis de temperatura para o experimento de secagem está fundamentada no fato que os alimentos ricos em açúcar como frutas, ao serem expostos a uma corrente de ar muito quente, sofrem alterações superficiais na cor e consistência, conhecidas como escurecimento enzimático e não-enzimático.

O escurecimento enzimático é causado pela liberação de enzimas localizados nas células do próprio alimento e afetam principalmente a cor do alimento. O escurecimento não-enzimático ou caramelização é uma reação resultante do superaquecimento do açúcar contido no alimento, gerando um endurecimento superficial e uma posterior queda na taxa de secagem da amostra. Como este fenômeno da caramelização é mais evidente na banana, Freire (1999) reduziu a temperatura do ar aquecido para 50 °C em seus experimentos.

As amostras foram colocadas sobre um suporte em forma de arame metálico perfurado. Com esse arranjo, as superfícies superior e inferior das amostras foram

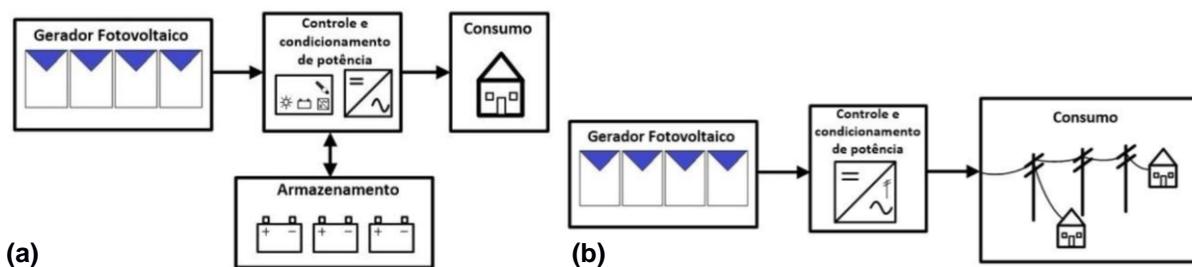
expostas a uma distância entre a bandeja e a balança suficiente para circular o ar de secagem por baixo das fatias e com o mínimo de interferência de área de contato nas superfícies, de forma similar ao arranjo de Freire (1999).

5.6 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico para Alimentação da Bancada

Nesta seção é apresentado o dimensionamento de um sistema fotovoltaico que poderá ser usado para alimentar a bancada. Também é feita a comparação de custos de um sistema isolado e de um conectado à rede. No Brasil, até a presente data, os sistemas fotovoltaicos de micro e mini geração, são regulamentados pela Resolução Normativa Aneel N° 482/2015 – atualizada pela RN N° 724/2017 (ANEEL, 2017).

O sistema isolado, também denominado *off-grid*, produz energia elétrica para acionamento direto dos equipamentos – Fig. 36 (a). O sistema é composto por placas fotovoltaicas, controlador de carga, banco de baterias, inversor de corrente, dispositivos de proteção contra surtos e fiação. Os painéis fotovoltaicos produzem eletricidade em corrente contínua a partir do aproveitamento da incidência de luz solar através de um campo nas células fotovoltaicas, potencializadas em arranjos em série e em paralelo – conforme a demanda de tensão e corrente da carga a ser alimentada. O controlador de carga gerencia a quantidade de energia procedente dos painéis, evitando sobrecargas e descargas excessivas das baterias. As baterias armazenam a energia elétrica gerada durante o dia, e são responsáveis por alimentar a carga elétrica dos equipamentos na ausência de geração dos painéis. O inversor transforma a corrente contínua vinda dos painéis e armazenada no banco de baterias em corrente alternada para se adequar à alimentação dos equipamentos. A fiação tem a função de conectar os componentes do sistema internamente e aos equipamentos, que devem ser corretamente dimensionados para não apresentarem superaquecimento nem fuga de corrente. Os dispositivos de proteção são a barra de equipotencialização (BEP), os dispositivos de proteção contra surtos (DPS) e os disjuntores (GTES/CEPEL/CRESESB, 2014).

Figura 26 – Diagrama esquemático dos sistemas FV isolado (a) e conectado à rede (b)

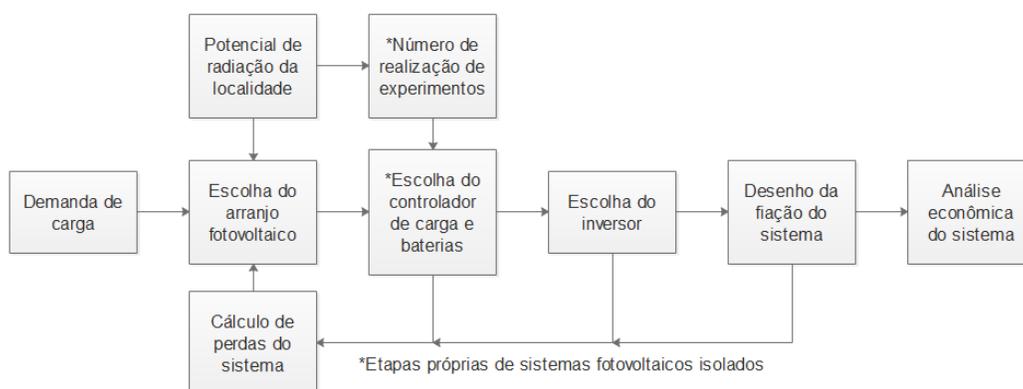


Fonte: GTES (2014).

O sistema conectado à rede, ou *grid-tie*, é outra modalidade de produção. A diferença para sistemas *off-grid* é que esta configuração não armazena, transferindo para a rede concessionária de energia local a produção excedente dos módulos fotovoltaicos – Fig. 26. Seus componentes são: painéis fotovoltaicos, inversores, medidor bidirecional de energia, dispositivos de proteção e a fiação. O arranjo de painéis fotovoltaicos é diretamente ligado ao inversor através de uma *string box*, dispositivo que isola o sistema fotovoltaico de sobrecargas e curtos-circuitos. A eletricidade convertida em corrente contínua por sua vez, se conecta à rede através de um medidor bidirecional, de modo que este redirecione a eletricidade conforme saldo de produção/consumo do sistema fotovoltaico.

Conforme Jäger *et al.* (2014), as etapas de dimensionamento são condensadas no fluxograma da Figura 27 para melhor visão da montagem do sistema. A primeira etapa do dimensionamento é estimar a demanda energética em função da potência instalada da bancada, que é mandatória para qualquer tipo de sistema.

Figura 27 – Fluxograma do dimensionamento do sistema de placas fotovoltaicas para obtenção de energia elétrica.



Fonte: Adaptado de Jäger *et al.* (2014).

A instalação de um sistema elétrico fotovoltaico é baseada de acordo com a potência instalada no local de consumo de energia. O dimensionamento é feito com o cálculo da demanda de carga, levantando as médias de consumo de energia e das resistências e ventiladores neste estudo (Jäger *et al.*, 2014). O procedimento detalhado para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos isolado e conectados à rede está apresentado no Anexo B, segundo as orientações de GTES/CEPEL/CRESESB (2014).

A energia consumida por dia pelos equipamentos, em corrente alternada e contínua, é calculada pelas Equações 9 e 10. Para a bancada experimental de secagem com roda dessecante, o levantamento do número de componentes presentes no sistema de secagem e suas respectivas potências de consumo é descrito na Tab. 3.

Tabela 3 - Levantamento do consumo e tempo de uso dos equipamentos da bancada experimental de secagem para demanda de carga.

Bancada experimental de secagem com roda dessecante e aquecimento por energia solar fotovoltaica			
Corrente	Item	Quantidade	Potência unitária (W)
CA	Resistência aletada	5	1000
CA	Ventilador	2	16
CA	Notebook	1	100
CA	Balança semianalítica	1	7,50
CA	Registrador gráfico	2	96
CA	Switch de 8 portas Ethernet	1	1,55
CA	Roda dessecante	1	1,80

Fonte: Autor.

Na etapa de obtenção dos dados de irradiação incidente no local do dimensionamento, os índices referentes à média mensal de irradiância solar e a média mensal de Horas de Sol Pleno ao longo do ano na região de Fortaleza, Ceará, ponto de estudo de dimensionamento, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Médias mensais de Horas de Sol Pleno e da radiação solar incidente na superfície horizontal.

Fortaleza/CE													
Latitude: 3,718° S / Longitude: 38,543													
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
kW/m ²	0,74	0,72	0,64	0,60	0,67	0,68	0,74	0,83	0,86	0,87	0,82	0,79	0,746
HSP	5,74	5,54	5,04	4,76	5,17	5,26	5,70	6,42	6,76	6,92	6,56	6,22	5,84

Fonte: Adaptado de *NASA Surface meteorology and Solar Energy*.

5.6.1 Análise de retorno de investimento de sistemas fotovoltaicos

Para analisar a viabilidade econômica do sistema fotovoltaico, é necessário estimar o retorno de investimento do projeto. Faz-se necessário elaborar o custo do ciclo de vida do projeto, somando todos os custos associados ao sistema, tanto de instalação como de operação, ao longo da vida de seus componentes, trazendo os custos futuros ao seu valor presente de modo a calcular quanto teria que ser investido (DUFFIE, BECKMAN, 2013).

A diferença entre os custos de ciclo de vida e a projeção de produção de energia forma a economia de ciclo de vida, baseando-se no fluxo de caixa periódico da receita do sistema. Este parâmetro é importante para se avaliar o financiamento da aquisição dos componentes do sistema fotovoltaico. Os itens principais do fluxo de caixa são: as parcelas do principal, os juros, os impostos e possíveis seguros para a instalação.

Para um financiamento, é necessário projetar em quanto tempo o sistema a ser instalado irá retornar o investimento feito pelo cliente, o chamado tempo de *payback*. Segundo Duffie e Beckman (2013), há diferentes definições de *payback* e depende da forma de como a instalação do sistema é financiada. O conceito pode se referir ao tempo necessário para o fluxo de caixa se tornar positivo, para que a economia cumulativa de energia iguale o investimento total inicial, para que a economia cumulativa chegue a zero, para que a economia cumulativa se iguale ao pagamento da entrada ou para que a economia solar cumulativa se iguale ao principal da dívida no sistema fotovoltaico. É determinado conforme a Eq. 7.

$$N_{\text{pay}} = \frac{\ln \left[\frac{C_{\text{sis}} \cdot i_F}{F \cdot L \cdot C_{F1}} + 1 \right]}{\ln (1 + i_F)} \quad (7)$$

Na qual N_{pay} é o número de anos necessários para que o sistema se pague, C_{sis} é o custo total do sistema, i_F é a taxa de reajuste da tarifa energética, F é a fração de

carga no caso do dimensionamento de sistemas conectados à rede, L é o acumulado anual do consumo da carga e C_{F1} é o custo da tarifa energética no ano de instalação do sistema fotovoltaico. Em termos de taxa, se comparado a outras aplicações financeiras, o retorno de investimento (ROI, *return on investment*) representa a taxa de mercado que resulta em uma economia de ciclo de vida igual a zero. É o parâmetro de auxílio na tomada de decisão para comparar se o investimento é mais rentável do que aplicações em ações, em aquisições imobiliárias, entre outros.

Neste trabalho, foi utilizado como parâmetro da análise de viabilidade financeira do projeto uma tarifa energética de R\$ 0,76164 o kWh com o reajuste anual tarifário de 2018 de 4,96% (ENEL, 2019).

6 RESULTADOS

Neste capítulo, os resultados experimentais das medições realizadas na bancada de secagem com roda dessecante são apresentados e discutidos. Esses resultados foram comparados aos de Freire (1999) e o tempo de secagem foi adicionado. O trabalho de dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos para alimentação da bancada foi realizado considerando o tempo real de acionamento dos equipamentos elétricos. É apresentado o custo total dos componentes dos sistemas fotovoltaicos autônomo e conectado à rede, e a estimativa de retorno de investimento são discutidos.

6.1 Bancada de secagem com roda dessecante

Uma fotografia da bancada de secagem com roda dessecante está mostrada na Fig. 28. Os detalhes construtivos estão apresentados no Apêndice A.

Figura 28 – Fotografia da bancada de secagem com o sistema de aquisição de dados

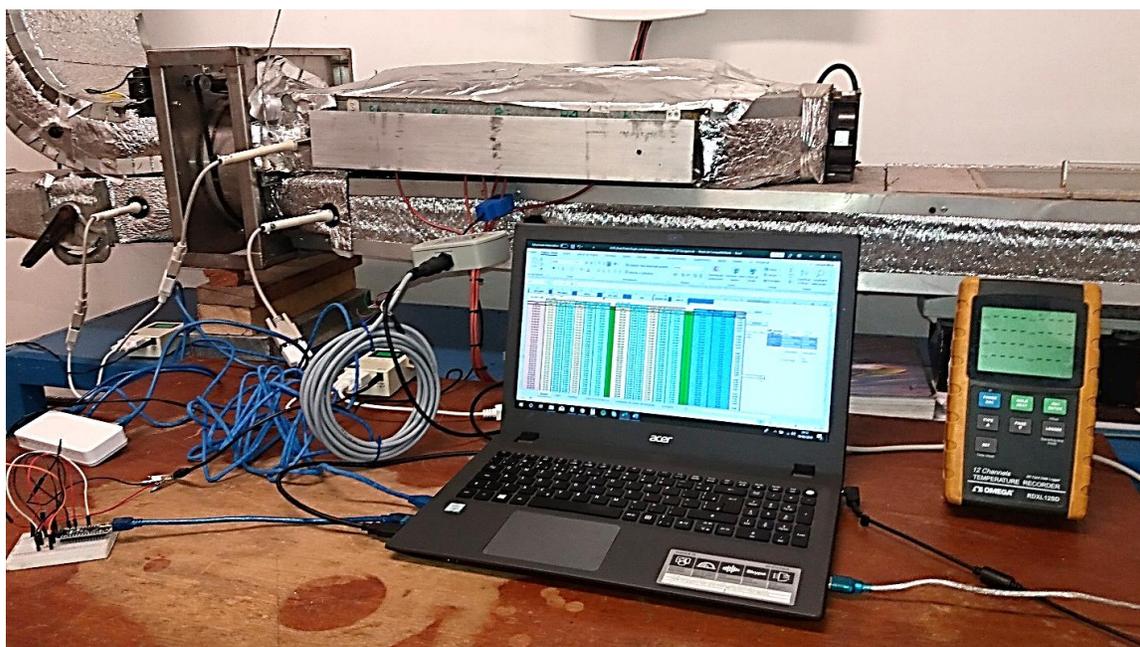


Fonte: Autor.

A Fig. 28 mostra os dutos e acessórios para os fluxos de processo (duto inferior), contendo da esquerda para a direita: ventilador de processo, controlador de fluxo, roda dessecante, câmara de secagem com a balança semianalítica sob a suporte de colocação da amostra e o duto curvado antes do exaustor que atravessa a parede do laboratório. Sobre o fluxo de processo está o fluxo de regeneração (duto superior), em que o sentido de fluxo na Fig. 28 é contrário ao fluxo de ar de processo e contém, da direita para a esquerda: ventilador, grupo de resistências elétricas, roda dessecante e duto curvado para expelir o ar úmido após dessorção atravessando a parede do laboratório. Observa-se também, fixado na parede, o quadro de acionamento elétrico das resistências e pontos de tomada para ligar os equipamentos de coleta de dados.

O processo de aquisição de dados, com as medições na planilha eletrônica, está mostrado na Figura 29. Todos estes sensores foram conectados ao *notebook*, ao centro, armazenando as medições instantâneas em uma planilha eletrônica (Fig. 30). No canto esquerdo superior da Fig. 29, está a roda dessecante com três sensores de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar.

Figura 29 – Foto do processo de aquisição de dados



Fonte: Autor.

Abaixo do grupo de resistências elétricas, localizado no centro da Fig. 29 e atrás do computador, está o sensor de corrente alternada não-invasivo em torno da fiação, em que a placa Arduino, no canto inferior esquerdo, converteu a leitura para dados e enviou ao computador. À esquerda do computador, está localizado o sensor de temperatura e velocidade do ar antes do local da amostra, por sua vez no canto direito superior da imagem. Também, à direita está o coletor de dados do termopar de penetração tipo T, com a balança semianalítica atrás do equipamento. A Fig. 30 mostra um exemplo da planilha organizada com os dados coletados durante um teste de secagem.

Figura 30 – Ilustração da planilha com a medição e tratamento dos dados após uma secagem

Tempo (min.)	Sonda iTHX-SD 1 (Ent. Des.)			Sonda iTHX-SD 2 (Saida Roda)			Sonda iTHX-SD 3 (Ent. Reg.)			Sonda iTHX-SD 4 (Saida Amostra)			FMA 1001A-V1	Termopar (T)	UX6200H
	TBS (°C)	ϕ (%)	TPO (°C)	TBS (°C)	ϕ (%)	TPO (°C)	TBS (°C)	ϕ (%)	TPO (°C)	TBS (°C)	ϕ (%)	TPO (°C)	VAr (m/s)	Tsólido (°C)	Massa (g)
0	30,30	55,46	20,33	55,49	17,69	23,20	71,85	12,03	29,22	47,53	17,87	16,99	0,28	32,39	10,09
5	30,29	55,24	20,28	55,27	17,70	23,02	71,65	11,98	29,00	48,86	16,30	16,64	0,34	32,90	9,31
10	30,23	55,56	20,29	55,17	17,84	23,07	71,59	11,99	28,95	49,41	16,33	17,09	0,32	33,14	9,13
15	30,27	55,86	20,42	55,20	17,67	22,94	71,69	12,02	29,09	49,82	15,91	16,98	0,29	33,40	8,52
20	30,43	55,89	20,58	55,36	17,51	22,92	71,83	11,97	29,11	49,99	16,01	17,23	0,31	33,68	8,28
25	30,48	55,94	20,63	55,49	17,47	22,98	71,95	11,94	29,15	50,01	16,14	17,37	0,30	33,89	7,43
⋮															
145	30,10	64,41	22,61	55,90	19,13	24,83	71,20	13,12	30,22	51,69	16,90	19,47	0,31	49,86	2,53
150	30,04	64,95	22,67	55,89	19,25	24,93	71,34	13,13	30,35	51,48	17,11	19,49	0,29	50,83	2,15
155	29,93	65,55	22,70	55,74	19,31	24,84	71,33	13,19	30,42	51,42	17,25	19,56	0,81	51,90	2,05
160	29,93	65,82	22,80	55,82	19,31	24,91	71,40	13,20	30,50	51,52	17,32	19,72	0,29	52,96	1,72
165	29,92	66,12	22,85	55,82	19,44	25,05	71,39	13,23	30,53	51,53	17,23	19,65	0,29	53,86	2,32
170	30,04	66,16	22,97	55,89	19,37	25,01	71,94	12,41	29,81	49,55	23,84	22,84	0,31	54,22	1,89
MÉDIA	30,30	60,31	21,67	55,68	18,42	24,01	71,61	12,54	29,75	50,78	16,76	18,50	0,31		
DESVIO	0,172818	3,428723	0,8138685	0,1919	0,596685	0,6592192	0,305332	0,428479	0,426681	0,884334	1,293636	1,149161096	0,086597594		

Fonte: Autor.

6.2 Resultados psicrométricos

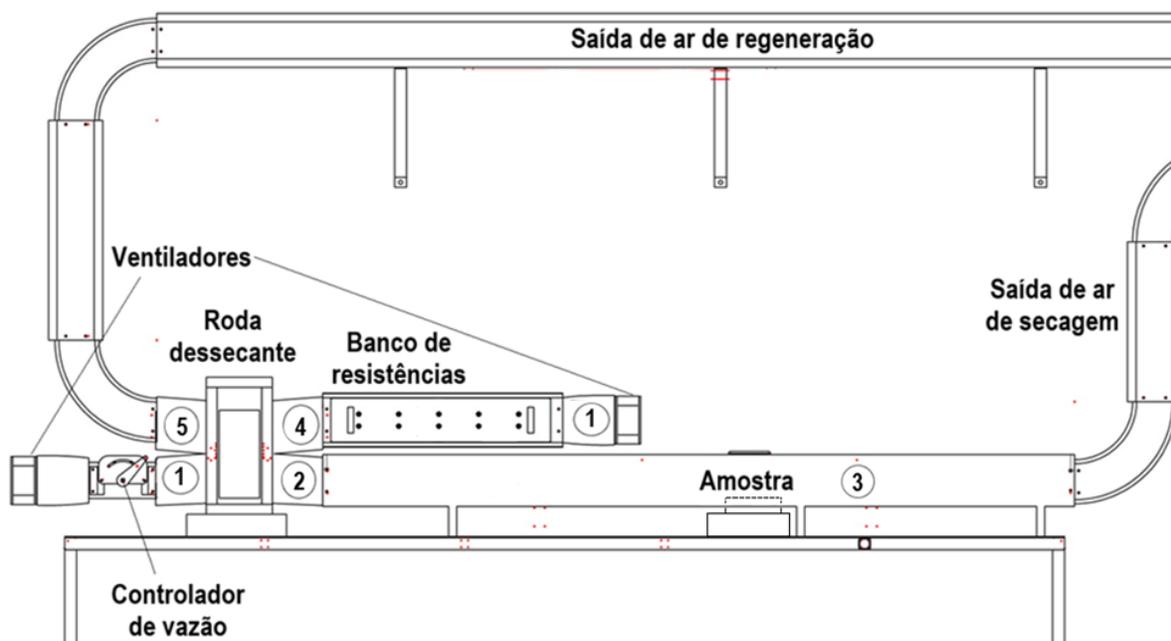
Os processos ocorridos na bancada durante a realização dos experimentos de secagem das amostras estão apresentados na carta psicrométrica da Fig. 31.

Na Fig. 31, referente à secagem de amostras de banana, a linha de (1) para (2) representa a passagem do ar ambiente pela desumidificação na roda dessecante no duto de processo, com aumento da temperatura de bulbo seco e redução da umidade relativa do ar. A reta de (2) para (3) descreve o ar que atravessou a amostra de secagem ao longo da operação, neste caso, fatias de banana, com redução da temperatura de bulbo seco e aumento da umidade relativa do ar. As duas retas descrevem o ciclo de processo durante a secagem da amostra.

Continuando na Fig. 31, a linha de (1) para (4) representa o processo de aquecimento sensível do ar ao fluir sobre as resistências elétricas. A linha de (4) para (5) representa a passagem do ar pela roda dessecante (regeneração da roda) onde ocorreu diminuição da sua temperatura de bulbo seco e da sua umidade relativa. Esses processos representam o ciclo de regeneração.

A Fig. 32 mostra os pontos de medição dos experimentos realizados na bancada com roda dessecante. O ponto 1 representa a condição do ar no laboratório, isolada dos efeitos de aquecimento pelo grupo de resistências e do ar nas saídas de processo e de regeneração.

Figura 32 – Desenho esquemático dos pontos de medição na realização do teste de secagem



Fonte: Autor.

Os dados apresentados na Tab. 5 foram retirados das leituras obtidas, para a secagem de maçã e banana, de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar dos sensores instalados na bancada. Estes representam a média das medições cada ponto da bancada de secagem com dessecante após o aquecimento das resistências em estado permanente.

Tabela 5 - Resultados experimentais de umidade e temperatura do ar durante o processo de secagem na bancada experimental com roda dessecante

Ponto do sistema	Propriedade termodinâmica	Amostra	
		Maçã argentina	Banana prata
Entrada da desumidificação e regeneração – 1	T_{BS} (°C)	30,66	30,42
	μ (g _{vapor} /kg _{ar seco})	17,21	17,09
Ar desumidificado após a roda dessecante – 2	T_{BS} (°C)	71,47	50,15
	μ (g _{vapor} /kg _{ar seco})	22,59	14,52
Ar após a amostra de secagem – 3	T_{BS} (°C)	64,01	46,15
	μ (g _{vapor} /kg _{ar seco})	15,71	14,71
Ar após resistências de aquecimento – 4	T_{BS} (°C)	119,65	58,52
	μ (g _{vapor} /kg _{ar seco})	17,23	16,95
Ar após regeneração na roda dessecante - 5	T_{BS} (°C)	40,21	34,01
	μ (g _{vapor} /kg _{ar seco})	30,94	24,42

Fonte: Autor.

6.3 Curvas de secagem e comparação da secagem com Freire (1999)

Para comparação entre os resultados obtidos nos processos de secagem usando apenas o calor sensível das resistências (Freire, 1999) e usando a bancada com a roda dessecante, a Tabela 6 apresenta as informações dos experimentos de secagem.

Tabela 6 - Resultados experimentais de secagem da banana e da maçã na bancada experimental de Freire (1999) e na bancada de secagem com roda dessecante

Tipo de bancada Amostra	Secagem com resistência elétrica (Freire, 1999)		Secagem com roda dessecante	
	Maçã argentina	Banana prata	Maçã argentina	Banana prata
Temperatura de secagem (°C)	71,5	50	71,47	50,15
Umidade absoluta média do ar de processo (g _{água} /kg _{ar seco})	23,8	12,74	22,59	14,52
Massa inicial (g)	9,01	39,04	9,62	38,88
Massa final (g)	5,54	18,41	1,43	13,62
Tempo de secagem até equilíbrio com corrente de ar (h)	3,3	6	1,83	5
Taxa de umidade retirada da amostra (g/h)	1,05	3,44	4,47	5,05

Fonte: Freire (1999).

Com os resultados mostrados na Tab. 6, pode-se observar que o mesmo tempo de secagem de amostras de banana para as duas bancadas, sob condições de temperatura de bulbo seco de 50 °C do ar de secagem, produziu uma redução de massa 22,44% maior para a bancada com roda dessecante. Para a secagem de amostras de maçã a 71,5 °C, a redução de massa foi 136,02% maior para a bancada de secagem com roda dessecante em relação à secagem somente por aquecimento sensível de Freire (1999).

A Fig. 33 mostra uma fotografia das amostras de banana antes e depois da secagem na bancada com roda dessecante. Neste experimento, a taxa de umidade retirada foi de 5,05 g/h através de uma corrente de ar com temperatura de bulbo seco de 50,15 °C e umidade absoluta do ar de 14,52 g/kg, em um tempo de operação da bancada de secagem de 5 horas no qual as fatias de banana, quando o equilíbrio com a corrente de ar foi alcançado, como mostra a Tabela 6.

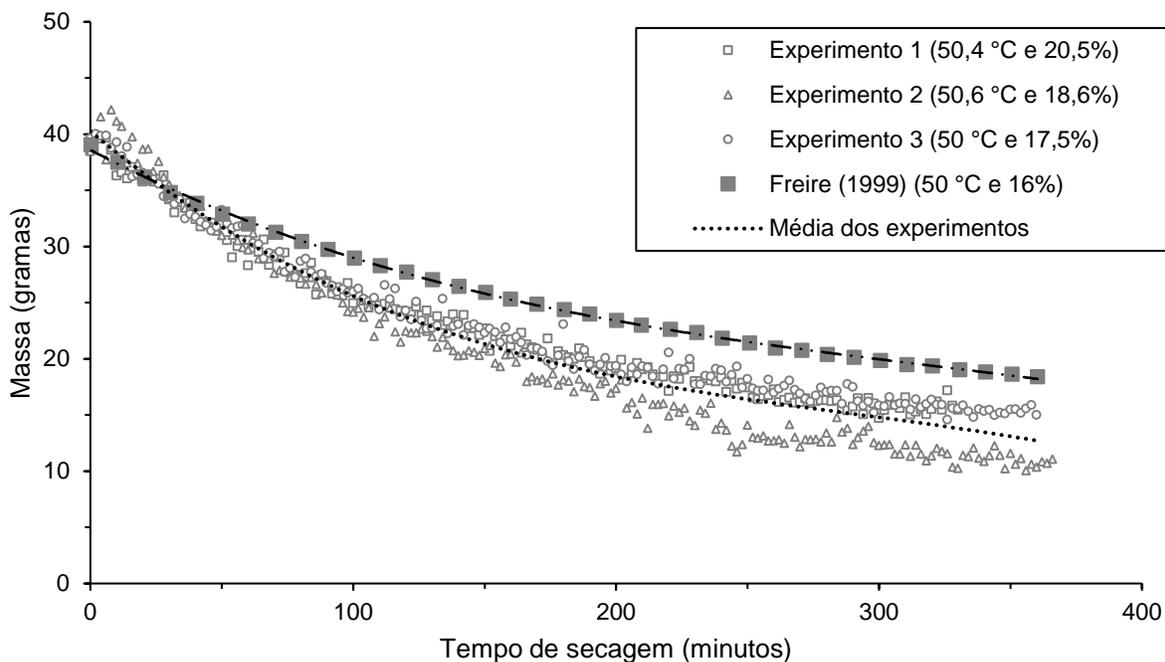
Figura 33 – Imagens da amostra de fatias de bananas descascadas antes (esquerda) e depois (direita) do experimento de secagem.



Fonte: Autor.

As curvas de secagens e as medições de temperatura interna da amostra estão presentes na Figuras 34 e 35. A Fig. 34 mostra também a curva de secagem registrada por Freire (1999). Na legenda, está identificada a secagem com a média da temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar próximas da amostra. As curvas mostram que a redução de umidade foi maior na secagem com dessecante, chegando ao valor mínimo médio de 26,9 g da média de massa final para as condições de 50,15 °C de temperatura de bulbo seco e 18,2% de umidade relativa.

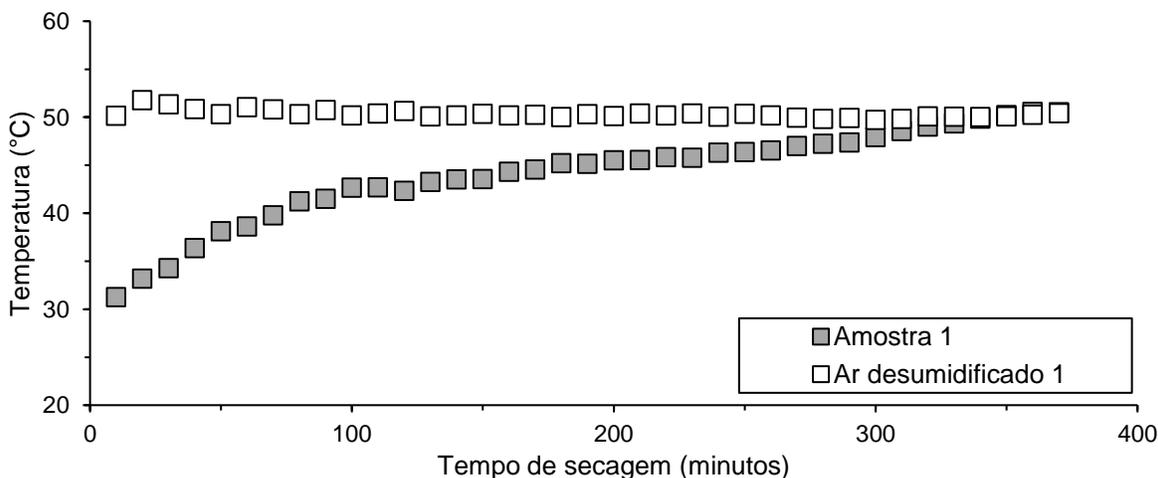
Figura 34 – Curvas de secagem de fatias de banana madura com a bancada de secagem com roda dessecante e de Freire (1999)



Fonte: Autor.

A Figura 35 mostra a temperatura interna da amostra, medida através de uma sonda termopar de penetração tipo T. A temperatura final da secagem foi aproximadamente de 50 °C, para uma temperatura de bulbo seco do ar de 50 °C.

Figura 35 – Curvas de secagem e a temperatura interna das amostras de banana



Fonte: Autor.

A curva de secagem das fatias de banana mostra uma redução de massa média de 25,26 gramas (64,69% da massa inicial) ao longo de 6 horas, caindo de 38,88 g a 13,62 – 22,44% a mais do que a redução apresentada por Freire (1999) de 20,62 g. Para alcançar a mesma massa final da curva de Freire (1999), levou-se entre 244 e 326 minutos nos três experimentos realizados, em média 84 minutos a menos para secar até este ponto de equilíbrio. Os dados obtidos das curvas de secagem das amostras de banana são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados experimentais de massa inicial e final das amostras de banana durante a secagem na bancada com roda dessecante a temperatura de 50 °C.

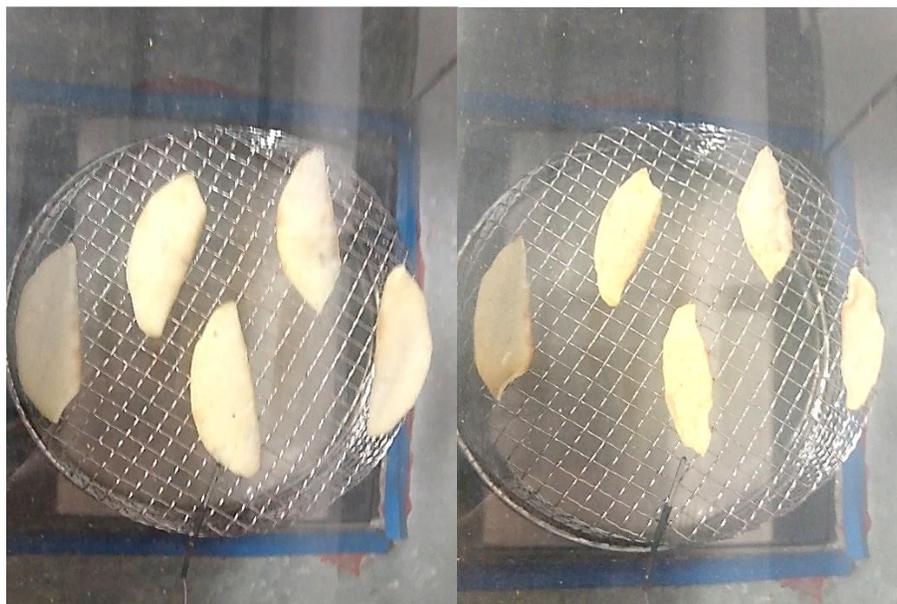
Amostra de banana	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Massa inicial (g)	38,53	38,49	39,62
Massa final (g)	15,46	10,37	15,02
Taxa de remoção de umidade (g/h)	4,61	5,62	4,92

Fonte: Autor.

Para a secagem da maçã, está apresentada a foto das amostras antes e depois do processo na Fig. 36.

Observa-se que a taxa de remoção de umidade da maçã foi de 4,47 g/h a uma temperatura de bulbo seco de 71,47°C e umidade absoluta de 22,59 g/kg, durante um tempo de secagem de 200 minutos, conforme Tab. 6.

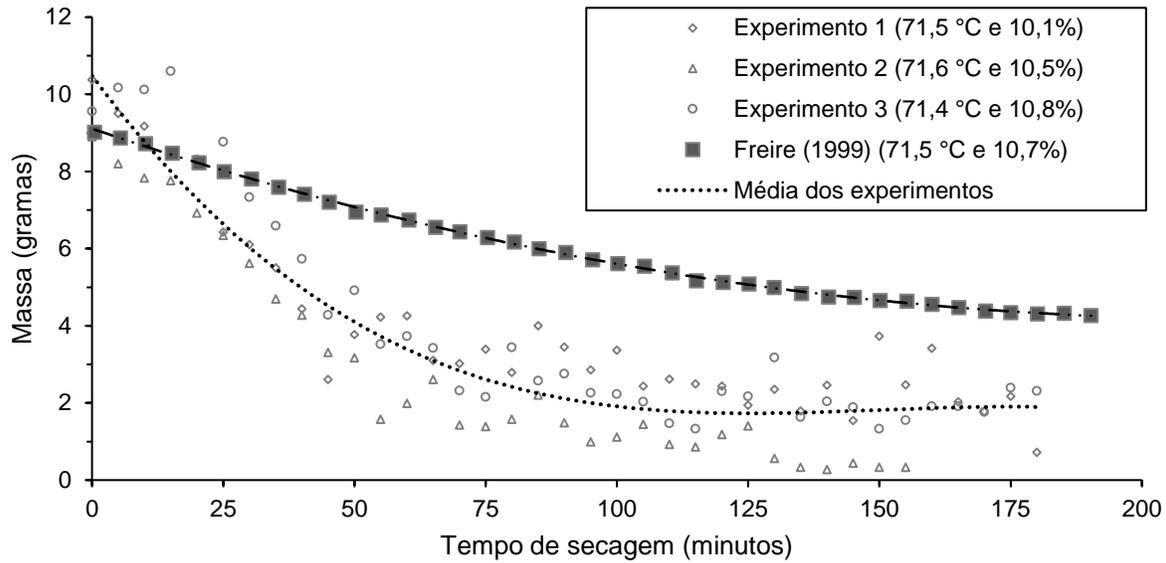
Figura 36 – Imagens da amostra de fatias de maçãs descascadas antes (esquerda) e depois (direita) do experimento de secagem



Fonte: Autor.

A amostra, com massa inicial média de 9,62 g, apresentou sua curva de secagem na Fig. 37, onde sofreu uma redução de massa de 8,19 g, representando 85,15% de perda de massa com a secagem. Em comparação com a secagem por aquecimento sensível, Freire (1999) obteve uma redução de 3,47 g. O tempo em que a secagem nos experimentos da bancada dessecante levou para alcançar a massa final do trabalho de Freire (1999) variou entre 35 e 55 minutos – diminuindo em média 80% do tempo de secagem. A estabilização da leitura de massa através da balança ocorreu após 100 minutos de operação.

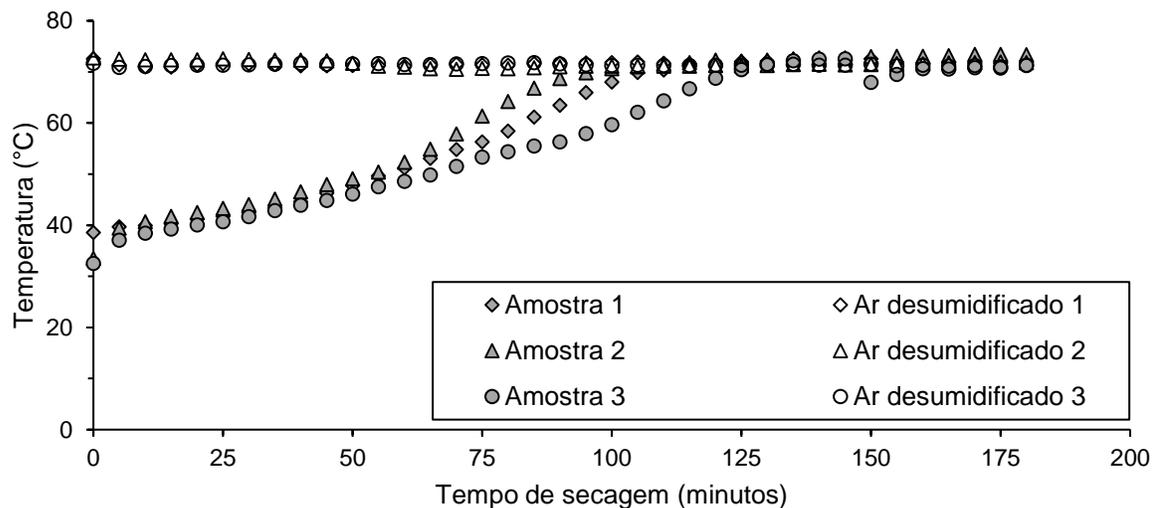
Figura 37 – Gráfico de secagem de amostras de maçã fatiadas.



Fonte: Autor.

A Fig. 38 apresenta a curva de secagem das amostras associadas ao aquecimento interno das amostras medidas com o termopar de penetração, na qual as fatias de maçã chegaram a uma temperatura interna entre 71,4 e 71,6 °C ao final de 200 minutos de operação da bancada de secagem.

Figura 38 – Curva de secagem de amostras de maçã fatiadas com a temperatura interna do alimento.



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos para a secagem de fatias de maçã estão disponíveis na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados experimentais de massa inicial e final das amostras de maçã durante a secagem na bancada com roda dessecante a temperatura de 71,5 °C.

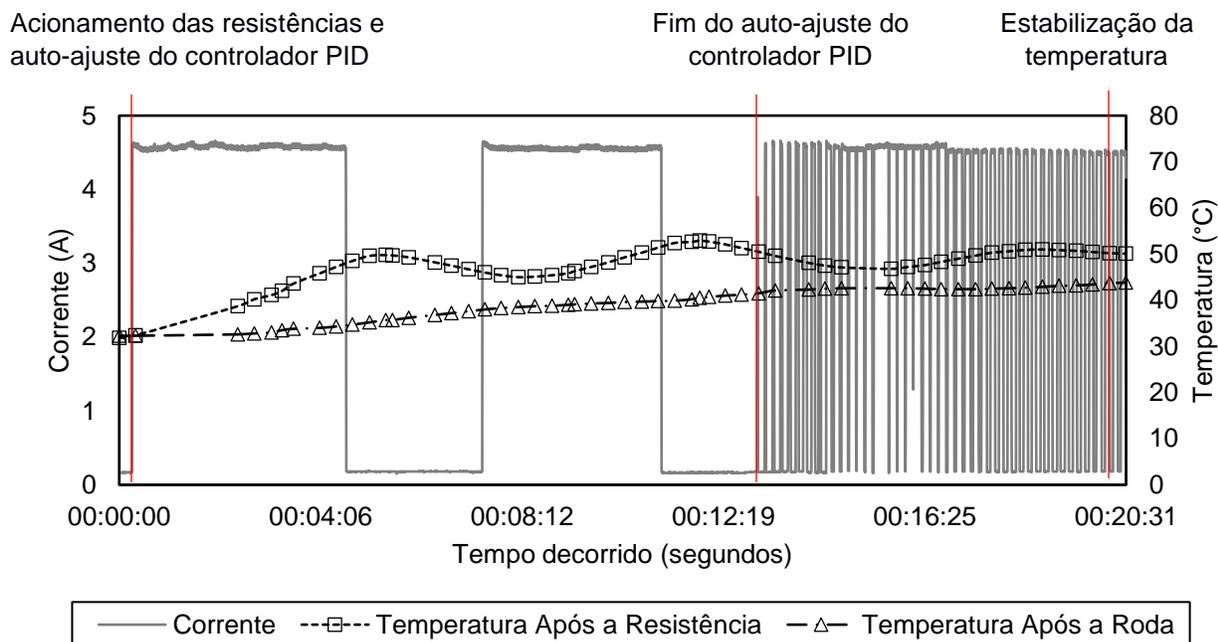
Amostra de maçã	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Massa inicial (g)	10,39	8,90	9,57
Massa final (g)	1,78	0,73	1,77
Taxa de remoção de umidade (g/h)	4,70	4,46	4,26

Fonte: Autor.

6.4 Medições de consumo de energia das operações de secagem

Os resultados do acionamento da bancada e o tempo de aquecimento da resistência até chegar a temperatura de bulbo seco desejada do ar de entrada da regeneração foi realizada utilizando o controlador PID e está apresentado na Figura 39. O gráfico contém a leitura de corrente que percorreu a resistência de aquecimento durante o período de ajuste dos parâmetros de controle de temperatura do início da operação da bancada a 30°C até o nível desejado de aquecimento do ar a 50°C e a resposta em temperatura até que se mantenha em estado estacionário. O tempo de auto ajuste registrado nos experimentos está entre 13 minutos e a estabilização da temperatura após o ajuste dura cerca de 5 minutos. Este tempo é importante posteriormente para as etapas de levantamento de demanda de carga nos dimensionamentos da alimentação por painéis fotovoltaicos.

Figura 39 – Leitura de corrente e resposta em temperatura do ar aquecido após o grupo de resistências para a secagem de banana.

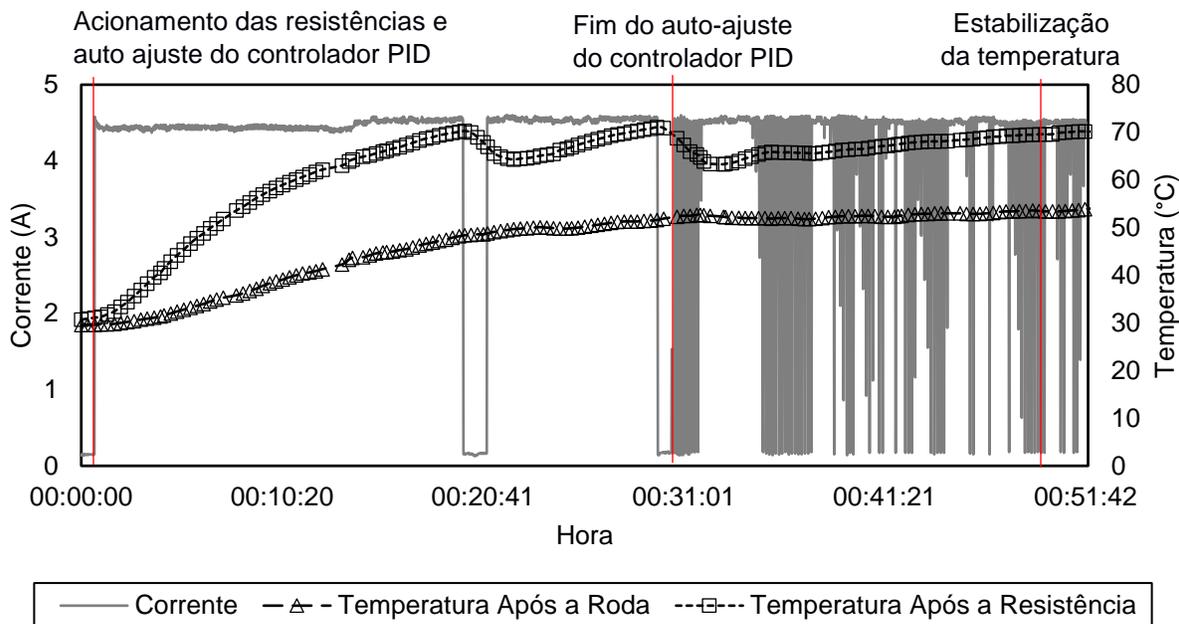


Fonte: Autor.

A média do consumo de energia medido para os testes de secagem de fatias de banana foi de 3,52 kWh, economizando 41,5% de energia através do controlador de temperatura com relação ao mesmo período de operação da bancada em acionamento integral das resistências.

O tempo de aquecimento e ajuste de temperatura pelo controlador na secagem de maçã, registrado na Fig. 40, foi de 30 minutos, levando adicionalmente cerca de 20 minutos até que a temperatura de *setpoint* de 71,5 °C se mantivesse. O consumo total de energia medido ao longo da secagem da maçã foi de 2,85 kWh. A intermitência causada pelo controlador de temperatura reduz o consumo energético do aquecimento do ar em 15% em relação a operação da bancada com acionamento ininterrupto da resistência.

Figura 40 – Leitura de corrente e resposta em temperatura do ar aquecido após o grupo de resistências para a secagem de maçã.



Fonte: Autor.

6.5 Dimensionamento do sistema fotovoltaico para alimentação da bancada

O dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos é apresentado nesta seção para operações isolada e conectada à rede. Foram incluídos os tempos de aquecimento e ajuste da temperatura antes do período de medição de secagem (30 minutos para a secagem de maçã e 15 para a secagem de banana) e dimensionados os sistemas com base em quatro configurações do sistema. A primeira configuração, denotada pela letra A, representa a bancada de secagem com os componentes do trabalho de Souza (2017), sem a roda dessecante. A segunda configuração, de letra B, envolve a bancada com roda dessecante, porém sem o uso de controlador de temperatura nas resistências de aquecimento. A terceira configuração, de letra C, que inclui o controlador PID na bancada de secagem com roda dessecante. A quarta configuração, letra D, apresenta economia de custo para dimensionar a bancada com roda dessecante e controle PID com base na redução de tempo gerada por esses componentes até a amostra alcançar o equilíbrio de

umidade com o ar de secagem. O levantamento dos componentes e da demanda de carga em todas as configurações estão apresentadas na Tabela 9.

Nas seções 6.5.1 e 6.5.2, estão apresentadas as etapas para os dimensionamentos do sistema autônomo e conectado à rede, respectivamente: desenho do arranjo fotovoltaico, listagem dos componentes, custos e expectativa de retorno de investimento. A tarifa energética utilizada como base da análise de viabilidade financeira do projeto foi de R\$ 0,76 o kWh, correspondente a 2019, com o reajuste anual tarifário de 2018 de 4,96% (ENEL, 2019).

Tabela 9 - Dados elétricos dos componentes da bancada de Souza (2017) (A) e da bancada com roda dessecante (B, C e D) para a secagem de banana

Item	Qtd.	Tempo de uso (h/dia)	Potência unitária (W)	Potência total (W)	Consumo de energia (kWh/dia)			
Configuração				A (Souza, 2017)				
Resistência aletada	1	6,25	1000	1000	6,25			
Ventilador	1	6,25	552	552	3,45			
Notebook	1	6,25	100	100	0,62			
Balança	1	6,25	27	27	0,17			
Registrador gráfico de umidade e temperatura	2	6,25	96	192	1,20			
Placa de aquisição de dados	1	6,25	2,1	2,1	0,01			
Total CA				1873,1	11,70			
Item	Qtd.	Tempo de uso (h/dia)		Potência unitária (W)	Potência total (W)	Consumo de energia (kWh/dia)		
Configurações		B e C	D			B	C	D
Resistência aletada	1	6,25	4,83	1000	1000	6,25	3,66	2,90
Ventilador	2	6,25	4,83	16	32	0,20	0,20	0,20
Notebook	1	6,25	4,83	100	100	0,62	0,62	0,49
Balança	1	6,25	4,83	7,5	7,5	0,05	0,05	0,04
Registrador gráfico de umidade e temperatura	2	6,25	4,83	96	192	1,20	1,20	0,93
Roda dessecante	1	6,25	4,83	1,8	1,8	0,01	0,01	0,01
Total					1333,3	8,33	5,74	4,57

Fonte: Autor, Adaptado de Souza (2017).

6.5.1 Sistema FV Autônomo

O sistema fotovoltaico autônomo foi dimensionado para carregar o banco de baterias durante qualquer época do ano, conforme a média mensal do valor da radiação solar para a região de Fortaleza/CE. Portanto, foi selecionado o mês de menor incidência de radiação solar (mês de abril) com 0,60 kW/m², segundo a Tabela 4. O sistema deve funcionar adequadamente no mês de abril, logo para os meses seguintes, o sistema estará superdimensionado. As Horas de Sol Pleno (HSP), que refletem o número de horas em que a irradiância solar deve permanecer constante e igual a 1 kW/m², foram de 4,76 h.

As demandas dos sistemas foram de: 11,7 kWh/dia (A), 8,33 kWh/dia (B), 5,74 kWh/dia (C) e 4,57 kWh/dia. Os componentes do sistema estão apresentados na Tabela 10. A tensão de entrada foi regulada pelos controladores de carga, definindo o arranjo de baterias para 24 VCC e sendo convertidos para 220 VCA pelos inversores, na frequência de 60 Hertz.

Tabela 10 - Resultados teóricos do dimensionamento do sistema fotovoltaico isolado para a secagem de banana

Modalidade da bancada	Configuração A	Configuração B	Configuração C	Configuração D
Potência do módulo (Wp)	280	280	260	320
Quantidade	15	11	9	6
Custo unitário (R\$)	594,00	594,00	570,00	709,00
Corrente máxima do controlador (A)	40	40	35	35
Quantidade	1	1	1	1
Custo unitário (R\$)	530,00	530,00	1.930,00	1.930,00
Potência do inversor (W)	4500	2860	2600	2000
Quantidade	1	1	1	1
Custo unitário (R\$)	14.175,00	6.802,63	6.802,63	1.899,00
Capacidade da bateria (A.h)	220	220	220	220
Quantidade	8	6	4	4
Custo total (R\$)	9.992,00	7.494,00	4.996,00	4.996,00
Equipotencializador	TEL 901	TEL 901	TEL 901	TEL 901
Quantidade	1	1	1	1
Custo unitário (R\$)	189,51	189,51	189,51	189,51
Custo total (R\$)	37.556,51	28.242,53	18.478,14	12.559,51

Fonte: Autor.

As demais características elétricas dos módulos fotovoltaicos estão no Anexo D.

O consumo energético em Ampère-hora (A.h) foi determinado para a seleção do banco de baterias, o valor calculado foi de 573,87 A.h (A), 408,48 A.h (B), 281,40 A.h (C) e 220,83 A.h (D). Para que o sistema fosse autônomo para o tempo de secagem de banana, a bateria escolhida tinha capacidade de 220 A.h, 40% de profundidade de descarga e tensão de 12 VCC. O Anexo apresenta as demais informações sobre o modelo da bateria.

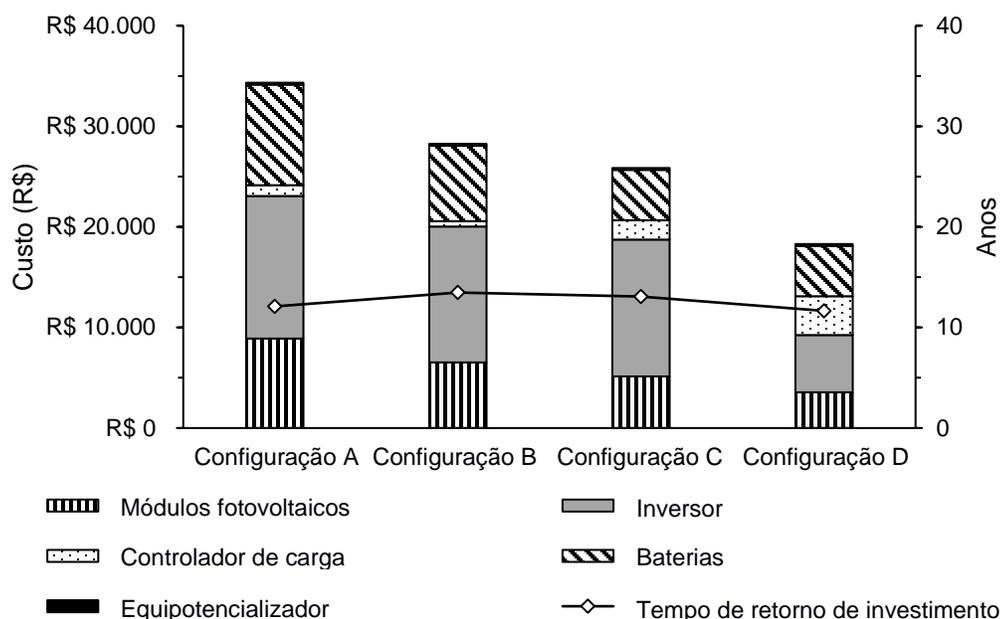
Os inversores devem ter uma potência nominal capaz de suportar o pico de produção de energia, em corrente contínua, dos módulos fotovoltaicos e convertê-la para corrente alternada. As potências correspondentes aos modelos escolhidos foram de 4500 W para a configuração A, 2860 W para B, 2600 W para C e 2000 W para D. Os controladores de carga regem a transmissão vinda dos painéis ou das baterias na ausência de incidência, a corrente máxima dos modelos utilizados foi de 40 A para as configurações A e B, e de 35A para C e D.

A Tabela 10 apresenta o número de módulos solares e de baterias necessárias para alimentação da bancada nos respectivos cenários, além da composição dos custos de aterramento incluindo a barra de equipotencialização, dispositivo de segurança contra sobrecargas do arranjo fotovoltaico. Demais características técnicas dos componentes encontram-se no catálogo do fabricante disponível no Anexo D.

Como a secagem da maçã ocorreu em 3,3 h, com menos tempo de operação da bancada do que a secagem da banana (6 h), o sistema fotovoltaico determinado tem como base de autonomia de uso o tempo de 6 horas. Desta forma, o sistema fotovoltaico isolado apresenta condições de realizar a secagem de amostras de banana ou maçã.

Os custos de cada modo de operação fotovoltaico estão mostrados na Fig. 41 em um gráfico de barras com as configurações descritas na Tabela 10. Além do levantamento de custos, a Fig. 41 apresenta, no eixo à direita, o tempo de retorno de investimento em anos, considerando não só o custo do sistema como também o valor gasto para reformar a bancada. Considerando a tarifa energética e taxa de reajuste anual para base de cálculo de viabilidade financeira, os tempos de retorno de investimento de A a D do sistema para a secagem de banana foram 12,1; 13,5; 13,1 e 11,7 anos, respectivamente.

Figura 41 – Custos dos componentes para as configurações de sistema fotovoltaico isolado para a secagem de banana e retorno de investimento sob tarifa de 0,76 R\$/kWh e reajuste anual de 4,96% (ANEEL, 2019)



Fonte: Autor.

Considerando a variação do percentual do custo, os painéis corresponderam de 19% a 26% do valor total do sistema e as baterias corresponderam de 19% a 29% do orçamento. O percentual dos inversores oscilou entre 31% e 53% e os controladores variaram entre 3% e 21% do orçamento total do sistema fotovoltaico isolado. Comparando o custo de um sistema com o outro, a configuração mais econômica foi a D com um custo 46,7% menor do que a bancada de Souza (2017) para banana.

6.5.2 Sistema FV Conectado à Rede

O sistema conectado à rede não precisa ser superdimensionado em função da demanda pelo mês crítico de radiação, graças ao crédito de alimentação elétrica dado pela concessionária local. Desta forma, a disponibilidade de energia diária foi baseada

na média anual de dados solarimétricos mensais apresentados na Tabela 4, com 5,84 Horas de Sol Pleno e a média anual da potência média da radiação solar foi de 0,745 kW/m². Para a secagem de banana, as demandas das configurações de A a D foram de 11,7; 8,3; 5,74 e 4,5 kWh/dia, respectivamente.

A Tabela 11 apresenta os valores nominais para os diferentes componentes do sistema fotovoltaico conectado à rede: painel solar, inversor, barra de equipotencialização e caixa de junção. A caixa de junção (*string box*) é um dispositivo de proteção em um sistema fotovoltaico que realiza um seccionamento da carga elétrica, tendo a função equivalente ao de um controlador de carga em sistemas fotovoltaicos autônomos. Às vezes, o inversor projetado para sistemas conectado à rede possui uma caixa de junção embutida.

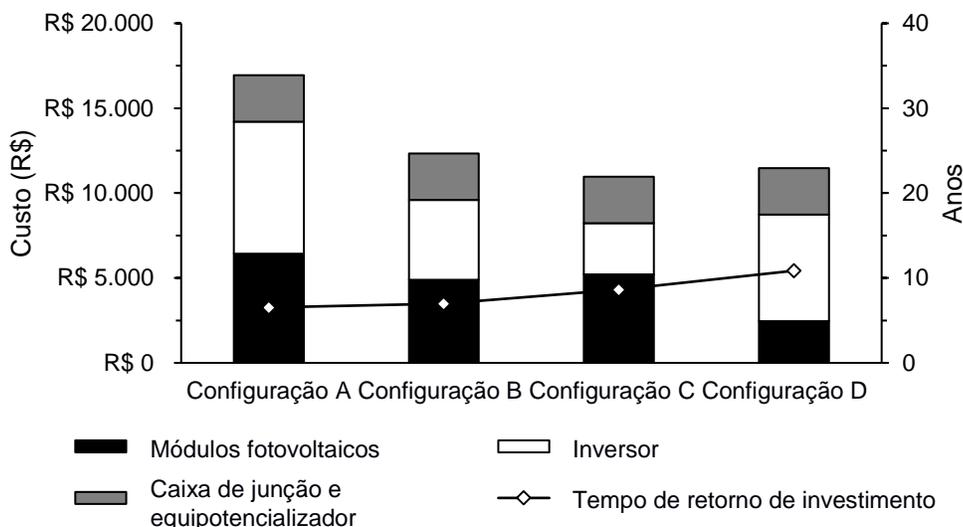
Tabela 11 - Resultados do dimensionamento do sistema fotovoltaico conectado à rede para amostras de banana

Modalidade da bancada	Configuração A	Configuração B	Configuração C	Configuração D
Potência do painel (Wp)	395	150	150	150
Número de painéis	7	16	17	8
Custo unitário (R\$)	919,00	305,97	305,97	305,97
Número de string-boxes	1	1	1	1
Custo unitário (R\$)	2.490,00	2.490,00	2.490,00	2.490,00
Potência do inversor (W)	3000	2000	1500	1300
Número de Inversores	1	1	1	1
Custo unitário (R\$)	7.779,00	4.699,00	3.019,00	6.290,00
Equipotencializadores	1	1	1	1
Custo unitário (R\$)	189,51	189,51	189,51	189,51
Custo total (R\$)	16.949,66	12.332,18	10.958,15	11.475,42

Fonte: Autor.

Os custos de cada modo de operação do sistema fotovoltaico estão apresentados na Fig. 42. Os tempos de retorno de investimento do sistema fotovoltaico para secagem de banana foram: para a configuração A, 6,5 anos; para a B, 7 anos; para C, 8,6 anos; e para D, 10,5 anos. Os custos, em comparação a sistemas autônomos, foram mais baratos para sistemas fotovoltaicos conectados à rede – em média 40% entre as configurações correspondentes. A composição percentual do custo dos componentes sobre o orçamento final variou de 21% a 47% para os módulos fotovoltaicos, e de 28% a 55% para os inversores.

Figura 42 – Custos dos componentes do sistema fotovoltaico conectado à rede para alimentação da bancada para a secagem de banana sob tarifa de 0,76 R\$/kWh e reajuste anual de 4,96% (ANEEL, 2019)



Fonte: Autor.

Com as informações apresentadas na seção 6.5.1, o sistema fotovoltaico isolado finalmente selecionado neste trabalho foi o da secagem com roda dessecante e economia de tempo pelo controle de acionamento das resistências (configuração D), ao custo total de R\$ 12.559,51, 66,5% mais barato que a instalação do sistema fotovoltaico na bancada com aquecimento sensível (configuração A).

Conforme as informações da seção 6.5.2, a configuração de sistema fotovoltaico conectado à rede selecionada foi a correspondente à secagem com roda dessecante e controle de temperatura sem redução de tempo (configuração C). Esta configuração apresentou um custo de R\$ 10.958,15 e foi 35,3% mais barato que a configuração da bancada de secagem com aquecimento sensível.

A configuração D na comparação entre os sistemas conectados à rede não apresentou o mesmo padrão de economia de custo de sistemas fotovoltaicos autônomos, em que a configuração D apresentou-se como a mais econômica, devido ao custo elevado do inversor.

Entre o sistema conectado à rede e o sistema autônomo, a modalidade conectada apresentou um custo 12,8% menor, sendo a escolhida após o dimensionamento.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou as modificações realizadas em uma bancada de secagem com aquecimento elétrico (Freire, 1999) que incluíram a instalação de uma roda dessecante para aquecer e desumidificar o fluxo de ar de processo. A inclusão da roda implicou na utilização de aquecimento elétrico em um duto adicional para regeneração da roda. Foram dimensionados sistemas fotovoltaicos, autônomo e conectado à rede elétrica, e foram realizados experimentos de secagem de amostras de maçãs e bananas.

As conclusões do trabalho foram:

- 1) A secagem na bancada com a roda dessecante promoveu um menor aumento da temperatura de bulbo seco e uma diminuição da umidade relativa da corrente de ar de processo. Esse condicionamento do ar otimizou a operação da bancada quando comparada à bancada com aquecimento sensível em três parâmetros:
 - a) Reduziu o tempo de secagem das amostras;
 - b) Removeu mais umidade das amostras, caracterizada pelo menor peso final;
 - c) Melhorou a qualidade final do produto, visto que foi secado em temperaturas de bulbo seco mais baixas.

- 2) Para a mesma temperatura de bulbo seco, a bancada com roda dessecante obteve maior eficiência no processo de retirada de água da amostra. Outros experimentos foram realizados, como na secagem da banana a 46 °C, mostrando que as condições ideais de secagem podem ser encontradas através da realização de experimentos, nos quais é possível a mudança de temperatura para valores inferiores aos tradicionalmente usados. Essa secagem em temperaturas mais baixas traz significantes melhorias na qualidade final do produto. Assim, a bancada com roda dessecante mostrou ser um aparato adequado para o

levantamento de novas curvas de secagem, mais otimizadas, de produtos.

- 3) A utilização do controle de acionamento da resistência elétrica operou de modo a diminuir o consumo de energia (com 53,5% de economia para a secagem da banana e 66% para maçã).
- 4) Os sistemas fotovoltaicos, autônomo e conectado à rede, foram dimensionados para menores capacidades devido ao controle de operação da resistência e o menor tempo de secagem. O sistema autônomo apresentou maior custo (R\$ 12.559,51) como esperado, mas com a vantagem de ser independente a políticas públicas governamentais e adaptável a instalação em localidades distantes da rede elétrica. O sistema conectado à rede apresentou menor custo final (R\$ 11.475,42).
- 5) A bancada experimental apresentou condições de ser usada para o levantamento confiável de dados de secagem, visto que os sensores e componentes são de boa precisão, como apresentado nas curvas do trabalho, e pode ser usada para o dimensionamento de secadores.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**. Instalações Elétricas de Baixa Tensão. 2. ed. rev. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <https://hosting.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/normas%20e%20relat%3rios/NRs/nbr_5410.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2019.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482 de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Resolu%C3%A7%C3%A3o%20Normativa%20482,%20de%202012%20-%20bip-junho-2012.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2019.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, Módulo 3 - Acesso ao Sistema de Distribuição. 7. ed. 1 de dezembro de 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/PRODIST-M%C3%B3dulo3_Revis%C3%A3o7/ebfa9546-09c2-4fe5-a5a2-ac8430cbca99>. Acesso em: 05 jun. 2019.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 687 de 24 de novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição - PRODIST. Disponível em: <<https://sogi8.sogi.com.br/Arquivo/Modulo113.MRID109/Registro1234175/resolucao%20normativa%20aneel%20n%C2%BA%20687,%20de%2024-11-2015.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2019.

ANGRISANI, Giovanni; MINICHIELLO, Francesco; ROSELLI, Carlo; SASSO, Maurizio. Experimental analysis on the dehumidification and thermal performance of a desiccant wheel. **Applied Energy**, Amsterdã, v. 92, p. 563-572, 2012.

ARDUINO. **Arduino Nano v3.0 Datasheet**. 2019. Disponível em: <https://content.arduino.cc/assets/NanoV3.3_sch.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2019.

ATUONWU, James C.; JIN, Xin; van STRATEN, Gerrit; van DEVENTER, Henk C.; van BOXTEL, Antonius J. B.. Reducing energy consumption in food drying: opportunities in desiccant adsorption and other dehumidification strategies. **Procedia Food Science**, Amsterdã, v. 1, p. 1799-1805, 2011.

BOURDOUX, Siméon; LI, Dan; RAJKOVIC, Andreja; DEVLIEGHERE, Frank; UYTENDAELE, Mieke. Performance of drying technologies to ensure microbial safety

of dried fruits and vegetables. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Chicago, v. 15, p. 1056-1066, 2016.

BRADFORD, Kent J.; DAHAL, Peetambar; van ASBROUCK, Johan; KUNUSOTH, Keshavulu; BELLO, Pedro; THOMPSON, James; WU, Felicia. The dry chain: reducing postharvest losses and improving food safety in humid climates. **Trends in Food Science & Technology**, Amsterdã, v. 71, p. 84-93, 2017.

CATALANO, Pasquale; FUCCI, Flavio; GIAMETTA, Ferruccio; La FIANZA, Giovanna. A system for food drying using humidity control and low temperature. **Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal**. Campobasso, v. 10, 2008.

CELESTINO, Sônia Maria Costa. **Princípios de secagem de alimentos**. 1. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2010.

CHUA, Kian Jon; CHOU, S. K.. Low-cost drying methods for developing countries. **Trends in Food Science & Technology**, Cingapura, v. 14, p. 519-528, 2003.

CHUNG, Jae Dong. Modeling and analysis of a desiccant wheel. *In*: ENTERIA, Napoleon; AWBI, Hazim; YOSHINO, Hiroshi. **Desiccant heating, ventilating and air-conditioning systems**. Cingapura: Springer, 2017. p.11-62.

CLEMENTE, Hugo Alberto López. **Novos parâmetros geométricos de componentes de tubos de vórtice para operação em baixas pressões e acionamento por sistema fotovoltaico**. 2018. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4th ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2013.

DUTTA, Binay K.. **Principles of mass transfer and separation processes**. 1st ed. Nova Delhi: PHI Learning, 2009.

EBUY, Habtamu Tkubet. **Simulation of solar cereal dryer using TRNSYS**. 2007. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - School of graduate studies, Addis Ababa University. Adis Abeba, Etiópia. 2007.

ELTRA. **Catálogo técnico resistência elétrica**. Disponível em: <<http://www.eltra.com.br/v3/catalogo/catalogo%20eltra.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2019.

ENTERIA, Napoleon; AWBI, Hazim; YOSHINO, Hiroshi. **Desiccant heating, ventilating and air-conditioning systems**. Springer, 2017.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. 2018. **Food loss and waste and the right to adequate food: making the connection**. Rome.

FONG, K. F.; LEE, Chun Kwong. Impact of adsorbent characteristics on performance of solid desiccant wheel. **Energy**, Londres, v. 144, p. 1003-1012, 2018.

FREIRE, Francisco Nivaldo Aguiar. **Construção de uma bancada experimental para levantamento de curvas de secagem de alimentos**. 1999. 50 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia dos Alimentos) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1999.

FREIRE, Francisco Nivaldo Aguiar; DA SILVA, Maria Eugênia Vieira; ZAPATA, Jorge Fernando Fuentes; MAIA, Geraldo Arraes. Desidratação de músculo de pescado em bancada experimental de Secagem de filé de peixe. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 6, n. 2, p. 273-278, 2003.

GE, Tian Shu, LI, Yong, WANG, Ru Zhu, DAI, Yan Jun. A review of the mathematical models for predicting rotary desiccant wheel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 12, p. 1485-1528, 2008.

GRUPO DE TRABALHO EM ENERGIA SOLAR. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - DTE - CRESESB, 2014. Disponível em:

<www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 02 mai. 2019.

INOVA. **Manual de instruções INV-40003**. 2017. Disponível em: <https://www.eletopecas.com/_uploads/ProdutoDownload/produto_6967.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2019.

JÄGER, Klaus; ISABELLA, Olindo; SMETS, Arno H. M; van SWAAIJ, René A. C. M. M.; ZEMAN, Miro. **Solar Energy: Fundamentals, Technology and Systems**. Delft: Delft University of Technology, 2014.

KABEEL, A.E.; ABDELGAIED, Mohamed. Performance of novel solar dryer. **Process Safety and Environmental Protection**, Londres, v. 102, p.183-189, 2016.

KERR, William L.. Food drying and evaporation processing operations. *In*: KUTZ, Myer. **Handbook of farm, dairy and food machinery engineering**. 2nd ed. Nova Iorque: Elsevier, 2013. p. 317-354.

MADHIYANON, Thanid; ADIREKRUT, Sermpong; SATHITRUANGSAK, Prasan; SOPONRONNARIT, Somchart. Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: drying performance and product quality studies. **Chemical Engineering and Processing**. Amsterdã, v. 46, p. 282-290, 2007.

MARCOTTE, Michelle; GRABOWSKI, Stefan. Minimizing energy consumption associated with drying, baking and evaporation. *In*: KLEMES, Jiri; SMITH, Robin; KIM,

Jin-kuk. **Handbook of water and energy management in food processing**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2008. p. 482-522.

MISHA, Suhaimi; MAT, Sohif; RUSLAN, Mohd Hafidz Hj; SOPIAN, Kamaruzzaman. Review of solid/liquid desiccant in the drying applications and its regeneration methods. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Amsterdã, v. 16, p. 4686-4707, 2012.

MISHA, Suhaimi; MAT, Sohif; RUSLAN, Mohd Hafidz Hj; SALLEH, Elias Ilias Bin; SOPIAN, Kamaruzzaman. Performance of a solar assisted solid desiccant dryer for kenaf core fiber drying under low solar radiation. **Solar Energy**. Londres, v. 112, p. 194–204, 2015.

MISHA, Suhaimi; MAT, Sohif; RUSLAN, Mohd Hafidz Hj; SALLEH, Elias Ilias Bin; SOPIAN, Kamaruzzaman. Performance of a solar assisted solid desiccant dryer for oil palm fronds drying. **Solar Energy**. Londres, v. 132, p. 415–429, 2016.

NASA. Surface meteorology and Solar Energy. Disponível em: <<https://eosweb.larc.nasa.gov>>. Acesso em: 8 mai. 2019.

NAVARRI, P.; FORTIN, C.; TAYLOR, G.. Diagnostic et gestion énergétique dans l'industrie des aliments: outils et supports, *In*: Gestion énergétique: Rentabilité em agroalimentaire. 2003. **Seminar**. Québec: Agriculture and Agri-Food Canada. 2003.

NAGAYA, Kosuke; LI, Ying; JIN, Zhehong; FUKUMURO, Masahiro; ANDO, Yoshinori; AKAISHI, Atsutoshi. Low-temperature desiccant-based food drying system with airflow and temperature control. **Journal of Food Engineering**. Amsterdã, v. 75, p. 71–77, 2006.

OMEGA. **FMA1000 Series Air velocity/Temperature Transmitter and Indicator User's Guide**. Disponível em: <https://assets.omega.com/pdf/test-and-measurement-equipment/temperature/sensors/thermocouple-probes/HYP_PROBES.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2019.

OMEGA. **Hypodermic and Mini Hypodermic Probes Thermocouple and RTD Elements**. Disponível em: <<http://br.omega.com/pptst/ITHXSD.html>>. Acesso em: 23 jun. 2019.

OMEGA. **iTHX-SD Temperature + Humidity User's Guide**. Disponível em: <<http://br.omega.com/pptst/ITHXSD.html>>. Acesso em: 23 jun. 2019.

OMEGA. **RDXL12SD 12-Channel Temperature Recorder with Excel-Formatted Data Logging SD Card User's Guide**. Disponível em: <<https://assets.omega.com/manuals/M4995.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2019.

PENNINGTON, Neal A., Humidity changer for air conditioning. U.S. Patent No. 2700537. USA, 1955. Disponível em:

<<https://patentimages.storage.googleapis.com/26/ab/c1/8d75b9d738504e/US2700537.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

PESARAN, Ahmad A; MILLS, Anthony F.. Moisture transport in silica gel packed beds— I. Theoretical study. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. Londres, v. 30, n. 6, p. 1037–1049, 1987.

PRAKASH, Om; KUMAR, Anil. Historical review and recent trends in solar drying systems. **International Journal of Green Energy**. Nova Iorque, v. 10, n. 7, p. 690-783, 2013.

PUNLEK, Chantana; PAIRINTRA, Rattanachai; CHINDARAKSA, Sirinuch; MANEEWAN, Somchai. Simulation design and evaluation of hybrid PV/T assisted desiccant integrated HA-IR drying system (HPIRD). **Food and Bioprocess Processing**. Londres, v. 87, p. 77-86, 2009.

ROBERT, Eric Hywel; ELLIS, Richard Harold. Water and seed survival. **Annals of Botany**. Oxford, v. 63, n.1, p. 39–52, 1989.

ROTORSOURCE. **Desiccant Dehumidification Technical Information**. Revisão 10-17. 2011. Disponível em:

<<https://cdn.websites.hibu.com/712870c44a5d42a0ae025deaeb5e98c2/files/uploaded/Desiccant%20and%20Passive%20Manual.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2019.

SEADER, J. D.; HENLEY, Ernest J.; ROPER, D. Keith. **Separation process principles**. 3rd ed. Nova Iorque: Wiley, 2010.

SHIMADZU. **Electronic Balance Instruction Manual UW/UX Series**. 2010. Disponível em: <<https://www.shimadzu.com/an/qn50420000070sh-att/UWUXSeries.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2019.

SILVA, Juarez de Souza e; LOPES, Roberto Precci; LOPES, D. de C., REZENDE, Ricardo Caetano. Princípios básicos de psicrometria. In: SILVA, Juarez de Souza e. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2. ed. Viçosa: Aprenda fácil, 2008.

da SILVA, Márcio Gomes; de MEDEIROS, Jesus Marlinaldo; GURGEL, José Maurício Alves de Matos. Estudo teórico e experimental da tecnologia dessecante aplicada ao condicionamento de ar em João Pessoa. **Revista Principia**. João Pessoa, v. 31, p. 62–76, 2016.

SOUZA, Lucas Jordane Santos. **Especificação de uma bancada de secagem com ligação à rede elétrica por sistema fotovoltaico**. 2017. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energias Renováveis) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SLIMANI, Mohamed El Amine.; AMIRAT, Madjid; BAHRIA, Sofiane; KURUCZ, Ildikó; AOULI, M'heni; SELLAMI, Rabah. Study and modeling of energy performance of a hybrid photovoltaic/thermal solar collector: configuration suitable for an indirect solar dryer. **Energy Conversion and Management**. Londres, v. 125, p. 209-221, 2016.

STIESCH, Gunnar. **Performance of rotary enthalpy exchangers**. 1994. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – College of Engineering, University of Wisconsin-Madison, Madison, 1994.

TIWARI, Sumit; TIWARI, Gopal N.. Energy and exergy analysis of a mixed-mode greenhouse-type solar dryer, integrated with partially covered N-PVT air collector. **Energy**. Londres, v. 128, p. 183-195, 2017.

TREYBAL, Robert Ewald. **Mass-Transfer Operations**. 3rd ed. Nova Iorque: Mc-Graw Hill, 1981.

TZEMPELIKOS, Dimitrios A.; BARDAKAS, Achilleas V.; VOUIROS, Alexandros P.; TSEPENEKAS, Dyonisios G.; CHRISTOLOUKAS, Dimitrios A.; FILIOS, Andronikos E.; MARGARIS, Dionissios P.. Design, construction and performance evaluation of a new laboratory convective dryer. *In*: 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPERIMENTS/PROCESS/SYSTEM MODELING/SIMULATION AND OPTIMIZATION. 2013, Atenas, Grécia. **Proceedings**. Atenas: IC-EpsMsO, 2013.

ULTRAR. **Datasheet Ultrar DF12308HB-L2**. Disponível em: <https://www.eletronics.com/_uploads/ProdutoDownload/produto_2113.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2019.

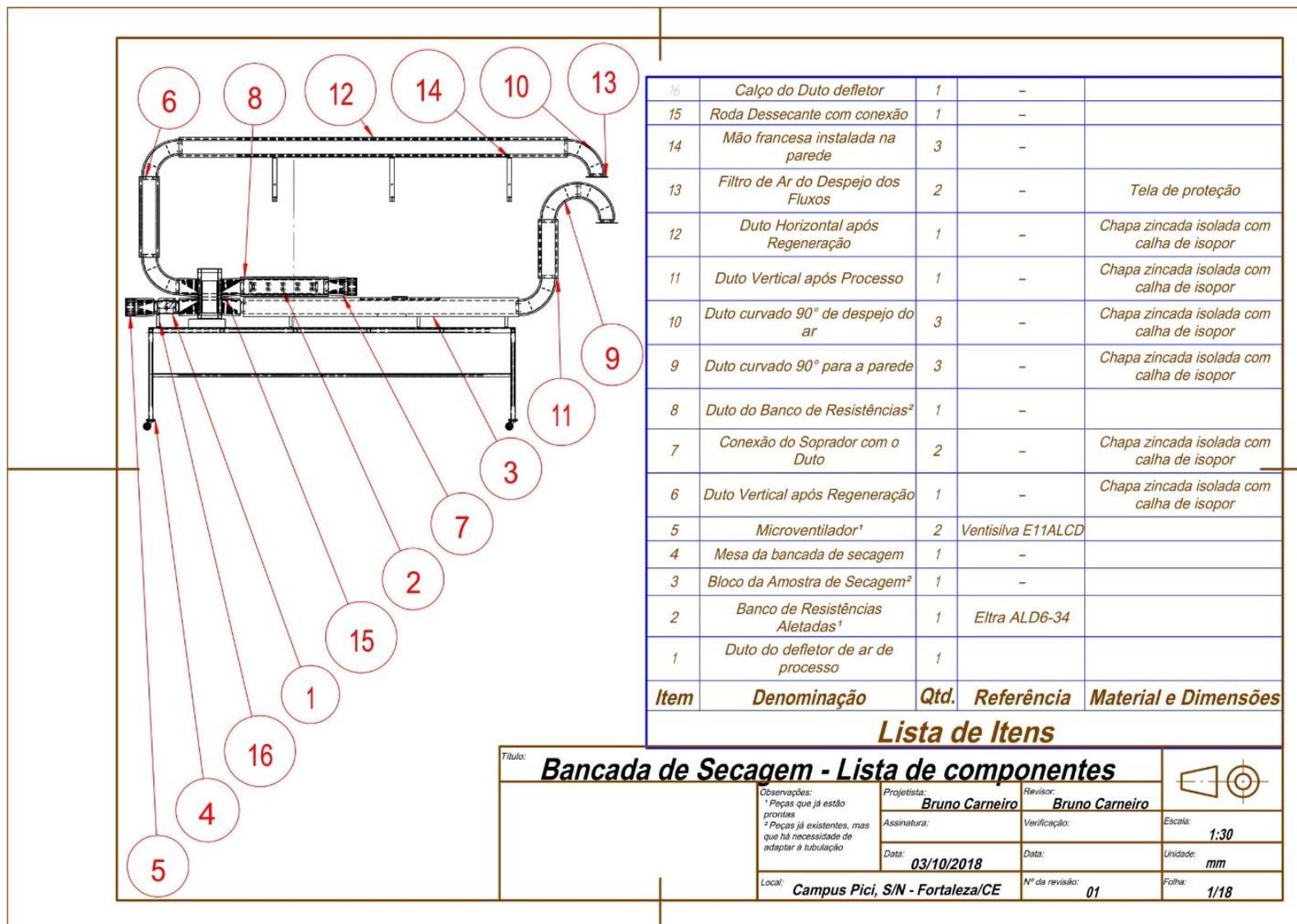
WU, X. N.; GE, Tian Shu; DAI, Yan Jun; WANG, Ru Zhu. Review on substrate of solid desiccant dehumidification system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Amsterdã, v. 82, p. 3236-3249, 2018.

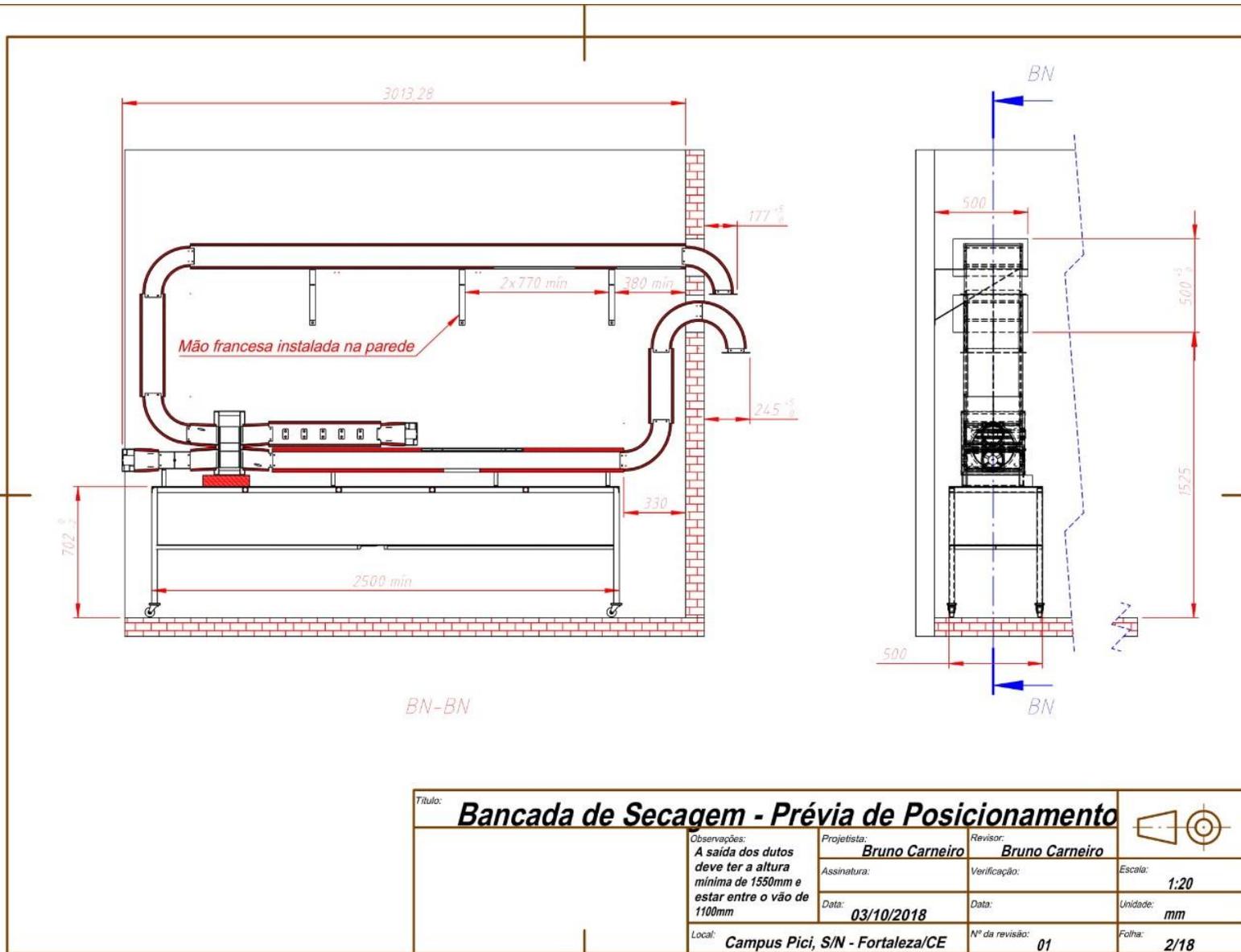
YAHYA, Muhammad; FUDHOLI, Ahmad; HAFIZH, Hadyan; SOPIAN, Kamaruzzaman. Comparison of solar dryer and solar-assisted heat pump dryer for cassava. **Solar Energy**. Londres, v. 136, p. 606-613, 2016.

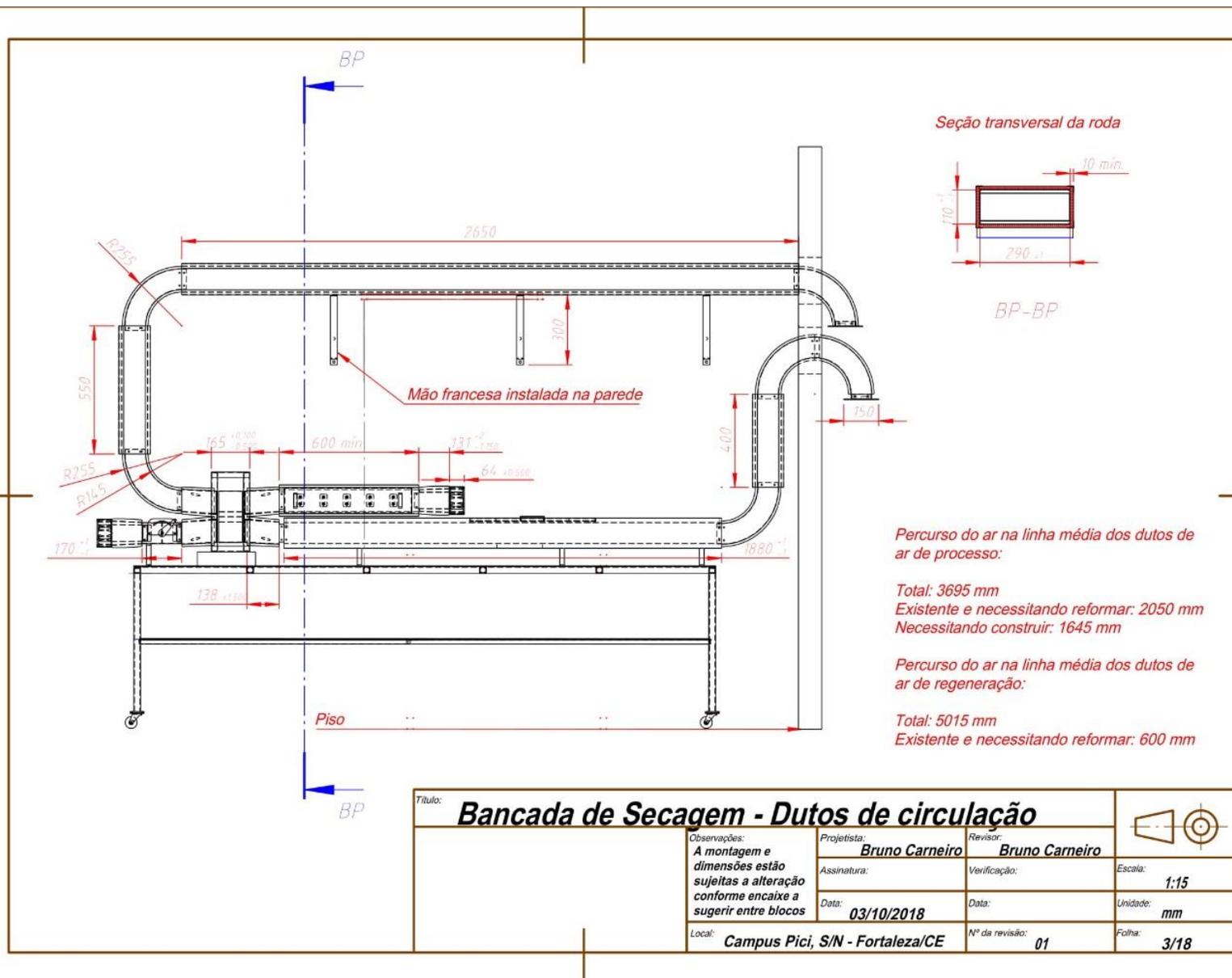
YHDC. **Split core current transformer datasheet**. Disponível em: <<http://en.yhdc.com/comp/file/download.do?id=950>>. Acesso em: 23 jun. 2019.

APÊNDICE

APÊNDICE A – DESENHO DA BANCADA DE SECAGEM

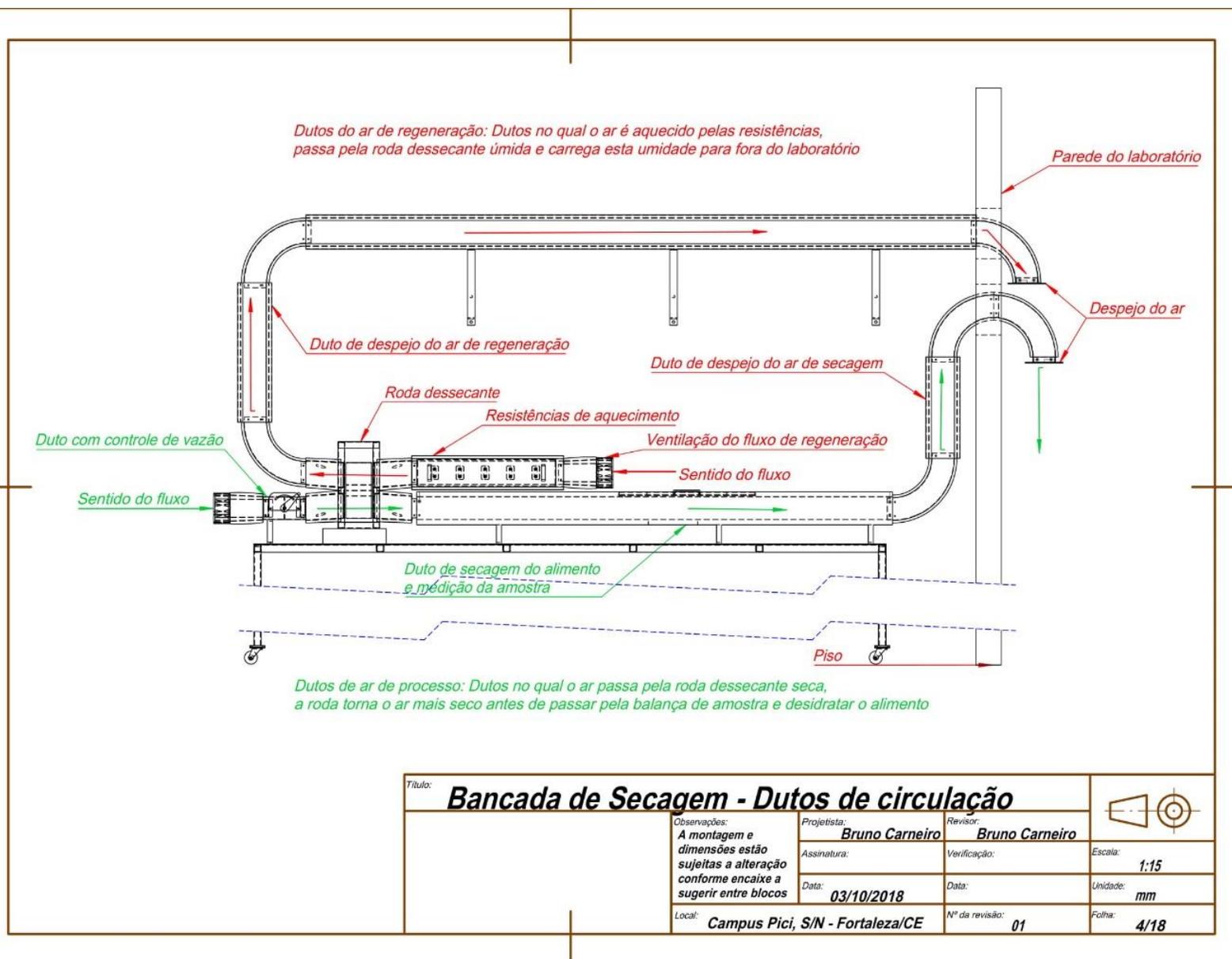






Bancada de Secagem - Dutos de circulação

Observações: A montagem e dimensões estão sujeitas a alteração conforme encaixe a sugerir entre blocos	Projetista: Bruno Carneiro	Revisor: Bruno Carneiro	
	Assinatura:	Verificação:	
	Data: 03/10/2018	Data:	Unidade: mm
	Local: Campus Pici, S/N - Fortaleza/CE	Nº da revisão: 01	Folha: 3/18



Título:

Bancada de Secagem - Dutos de circulação

Observações:
A montagem e dimensões estão sujeitas a alteração conforme encaixe a sugerir entre blocos

Projetista:
Bruno Carneiro

Assinatura:

Data:
03/10/2018

Revisor:
Bruno Carneiro

Verificação:

Data:

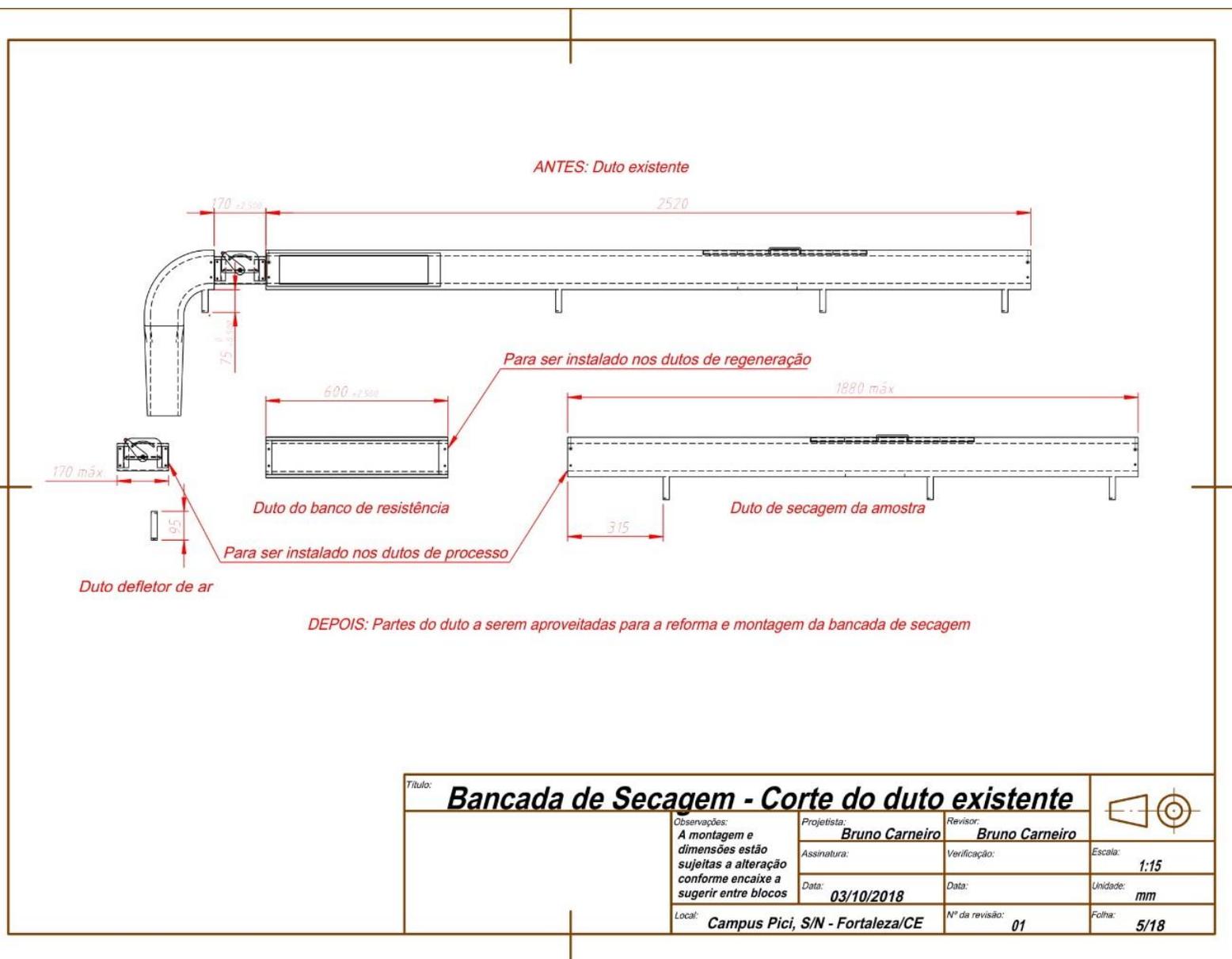
Nº da revisão: **01**

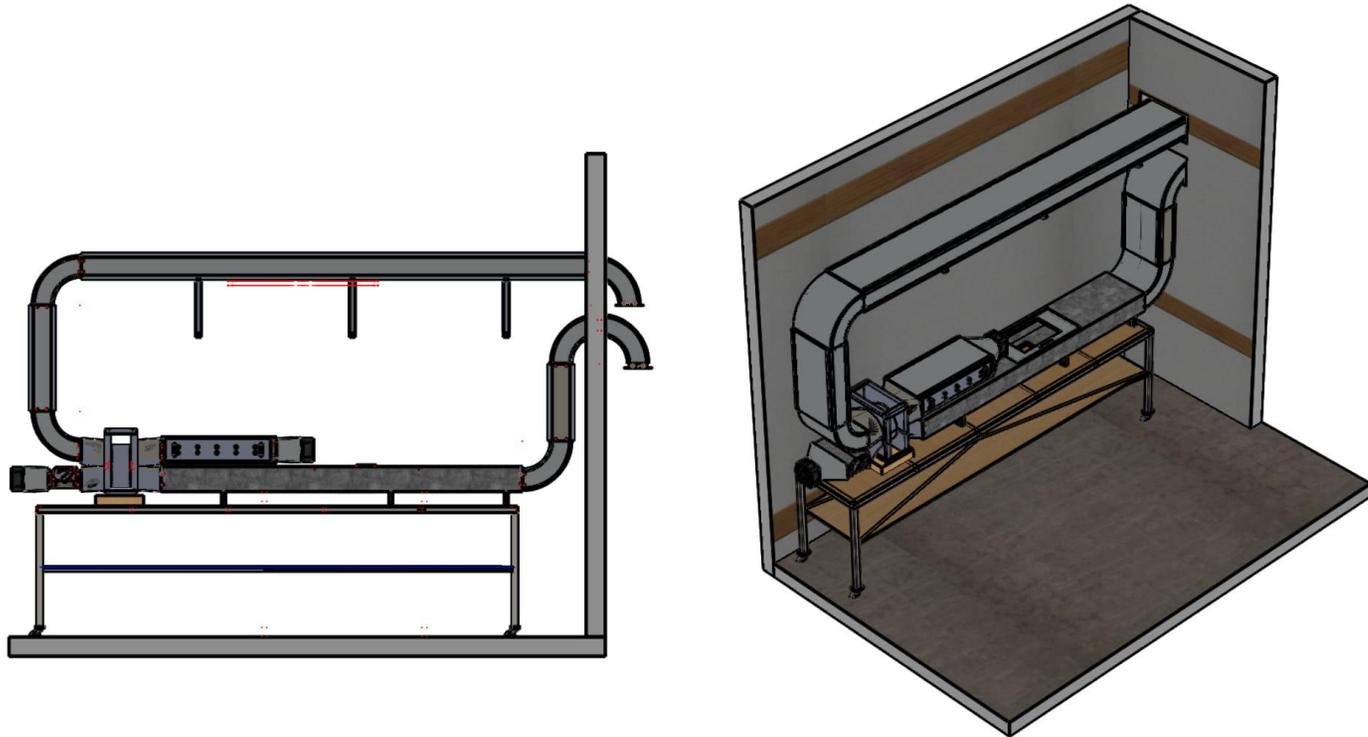
Escala:
1:15

Unidade:
mm

Folha:
4/18

Local:
Campus Pici, S/N - Fortaleza/CE





Título:

Bancada de Secagem - Conceitual da bancada

Observações:
A montagem e
dimensões estão
sujeitas a alteração
conforme encaixe a
sugerir entre blocos

Projetista:
Bruno Carneiro

Revisor:
Bruno Carneiro

Assinatura:

Verificação:

Escala:

Data:
03/10/2018

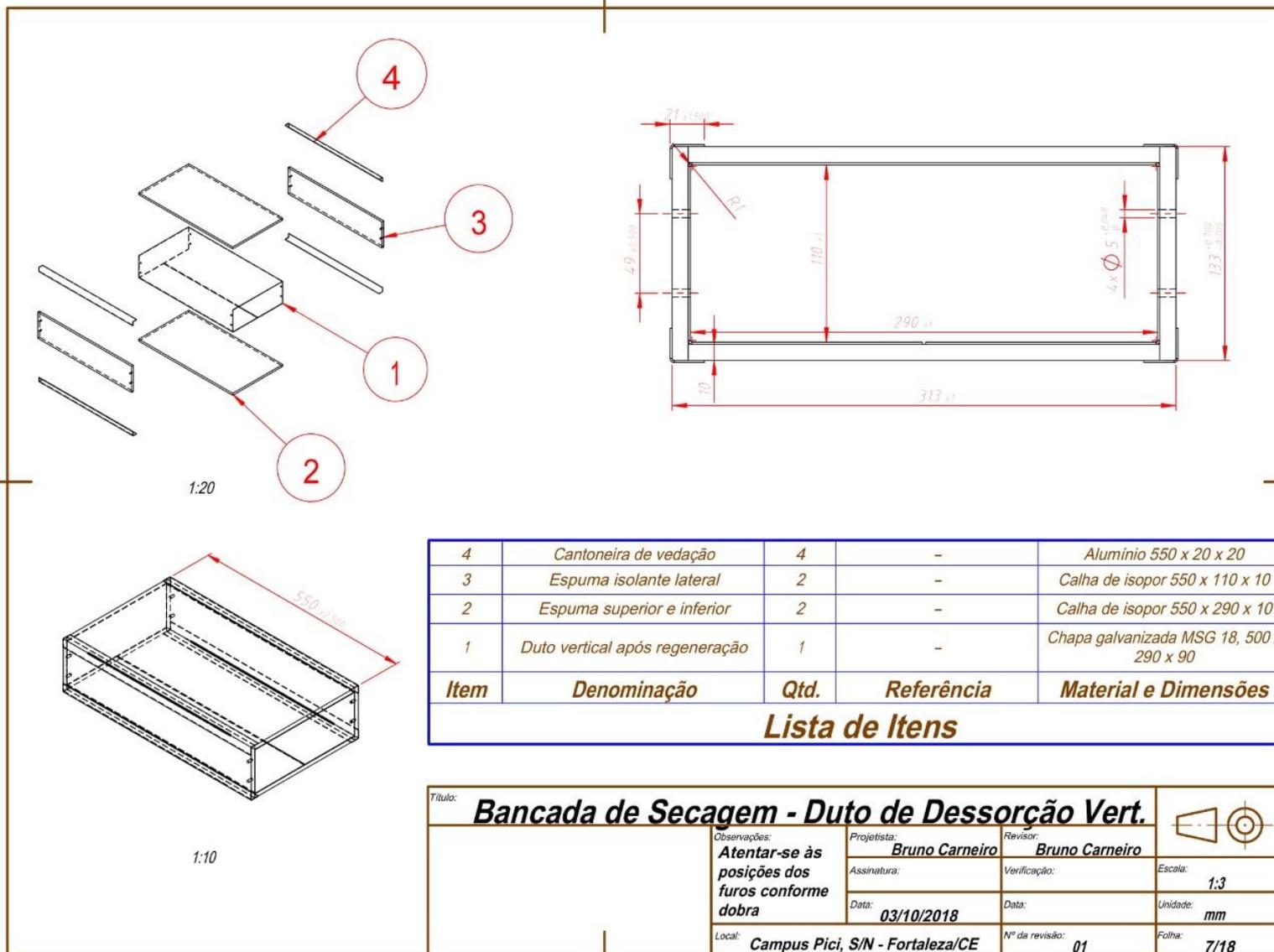
Data:

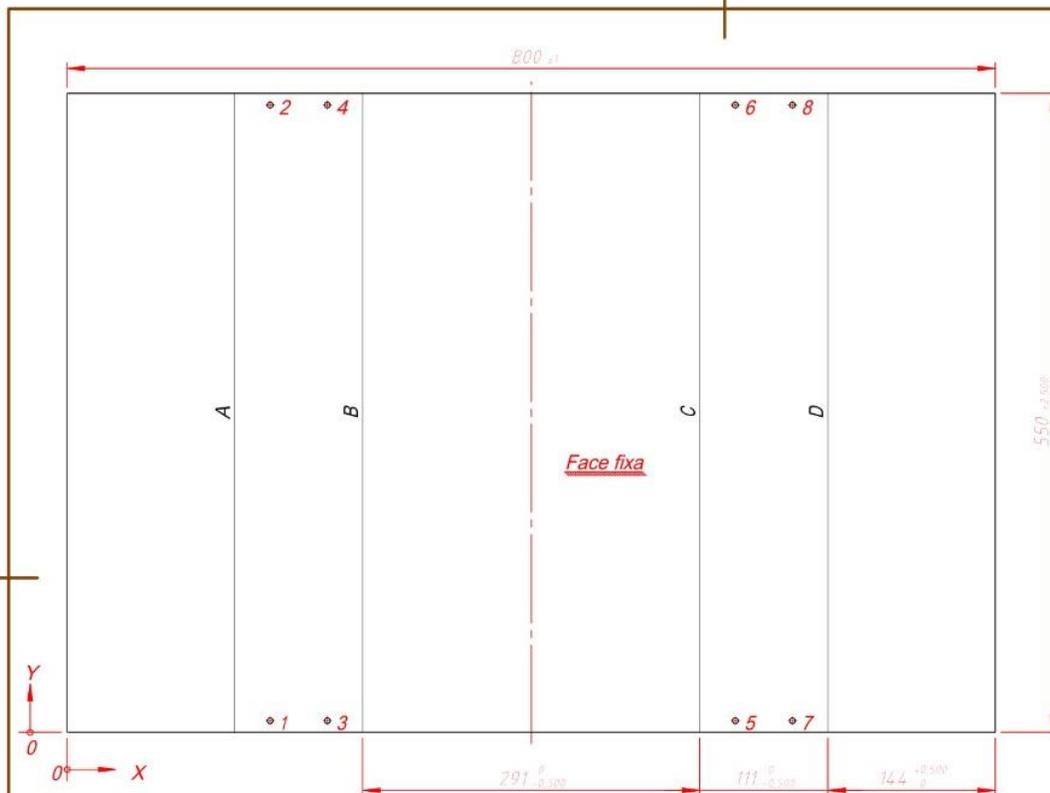
Unidade:
mm

Local:
Campus Pici, S/N - Fortaleza/CE

Nº da revisão:
01

Folha:
6/18

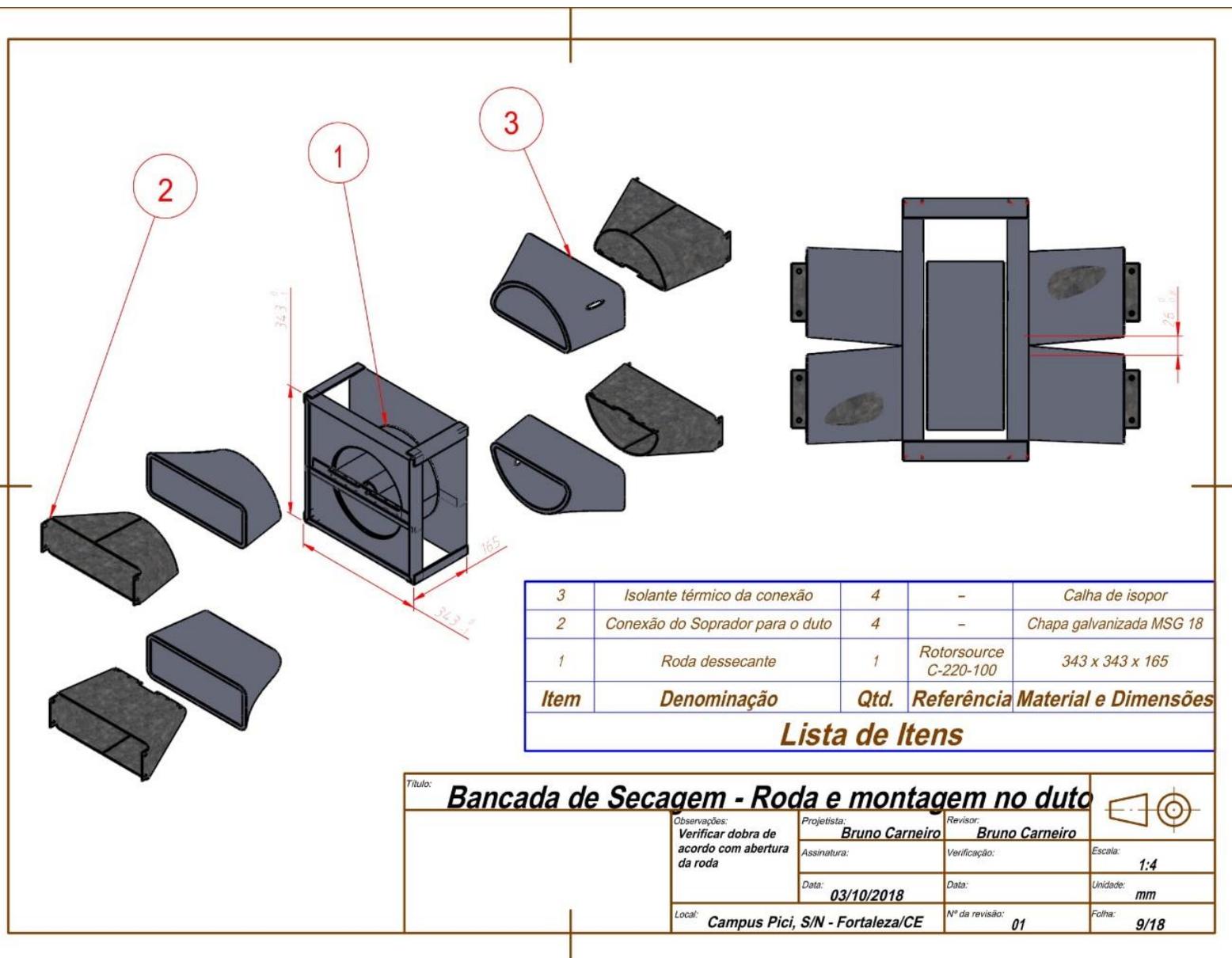


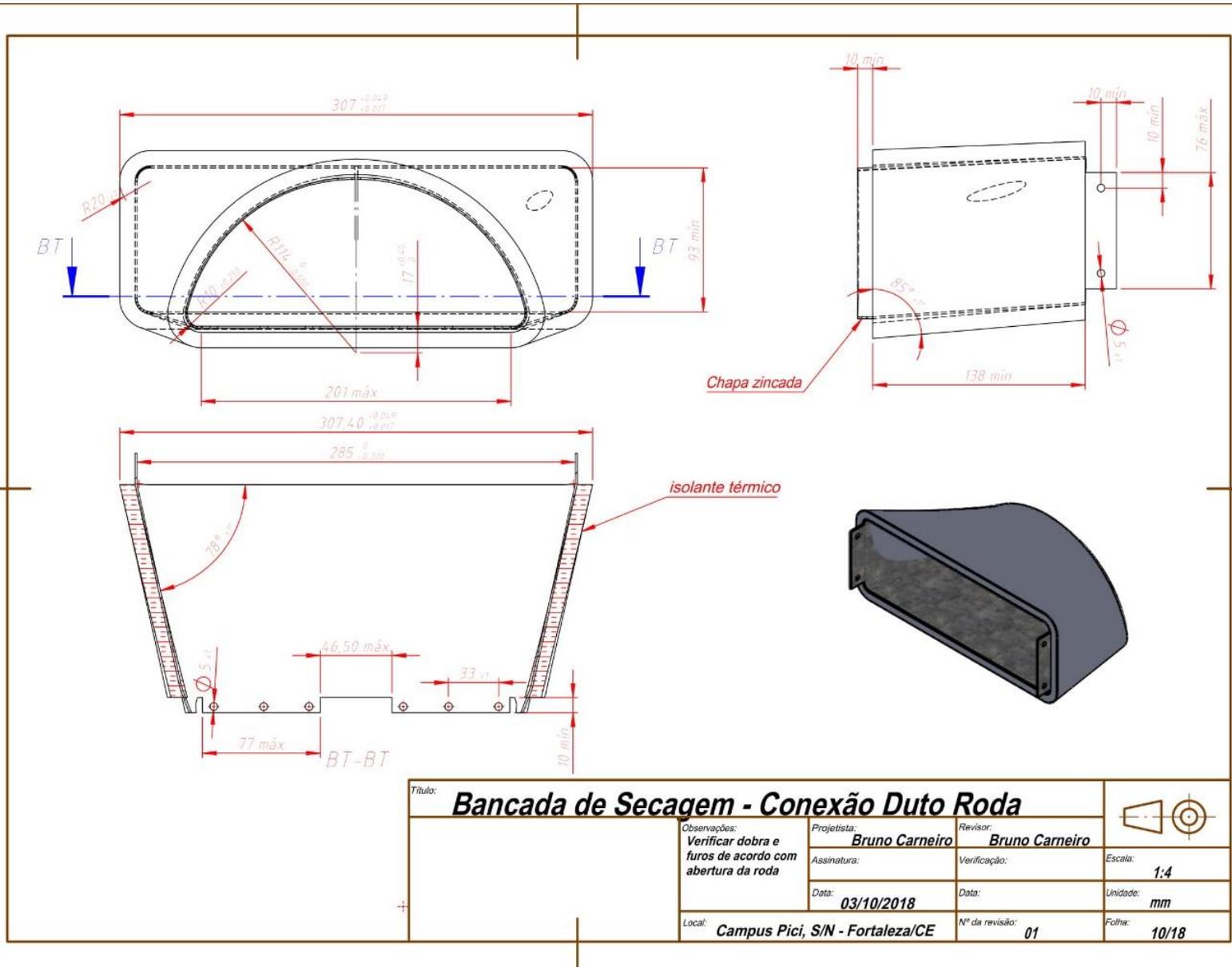


1	174,93	10	∅	5 PASSANTE TOTAL
2	174,93	54,0	∅	5 PASSANTE TOTAL
3	224,27	10	∅	5 PASSANTE TOTAL
4	224,27	54,0	∅	5 PASSANTE TOTAL
5	576,13	10	∅	5 PASSANTE TOTAL
6	576,13	54,0	∅	5 PASSANTE TOTAL
7	625,47	10	∅	5 PASSANTE TOTAL
8	625,47	54,0	∅	5 PASSANTE TOTAL
Rótulo	X	Y	Tamanho	

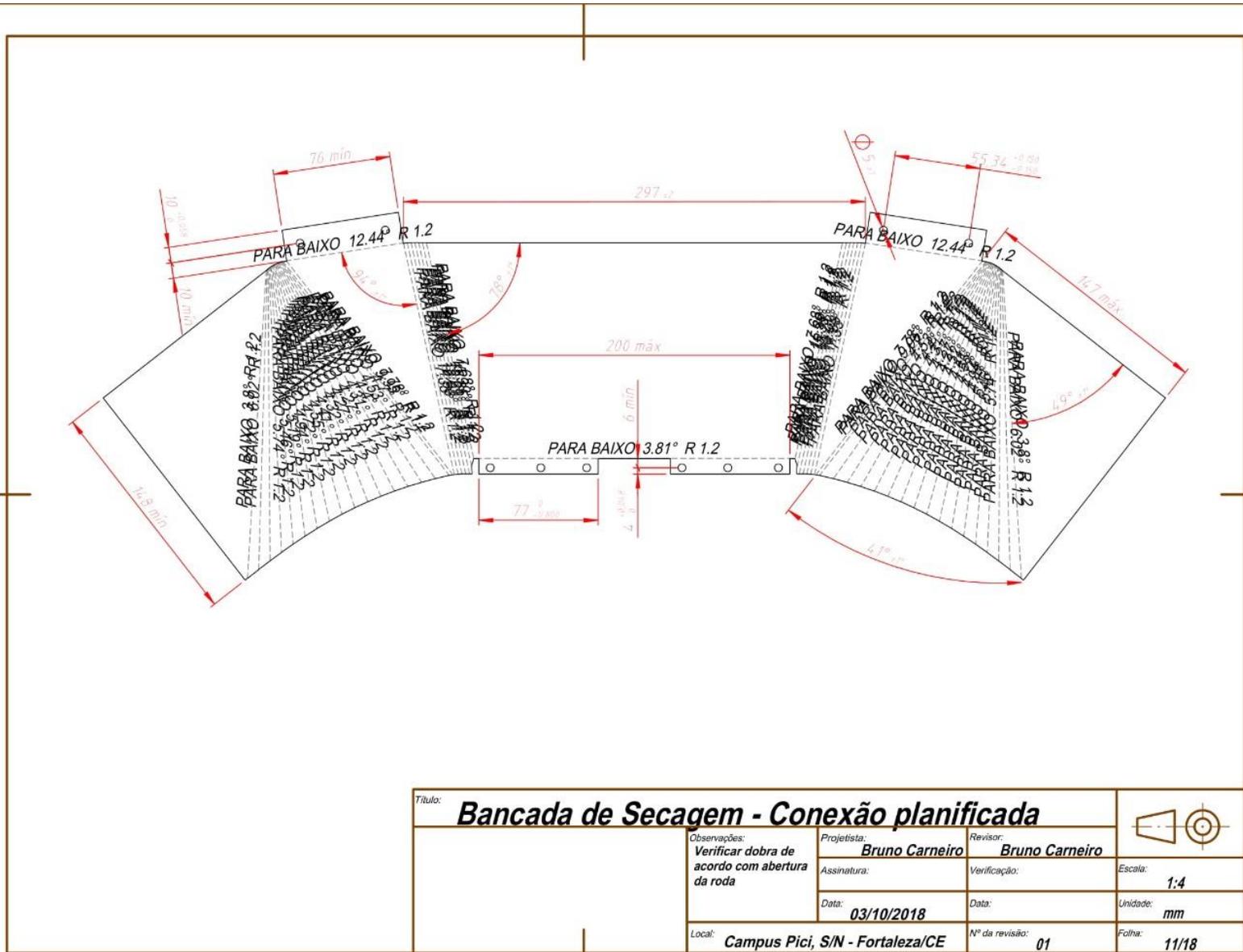
Rótulo	Direção	Ângulo	Raio interno
A	PARA CIMA	90°	1
B	PARA CIMA	90°	1
C	PARA CIMA	90°	1
D	PARA CIMA	90°	1

Título: Bancada de Secagem - Duto Dessorção Vert.			
Observações: Atentar-se aos furos conforme chapa e dobra	Projetista: Bruno Carneiro	Revisor: Bruno Carneiro	Escala: 1:5
	Assinatura:	Verificação:	Unidade: mm
	Data: 03/10/2018	Data:	Folha: 8/18
Local: Campus Pici, S/N - Fortaleza/CE	Nº da revisão: 01		

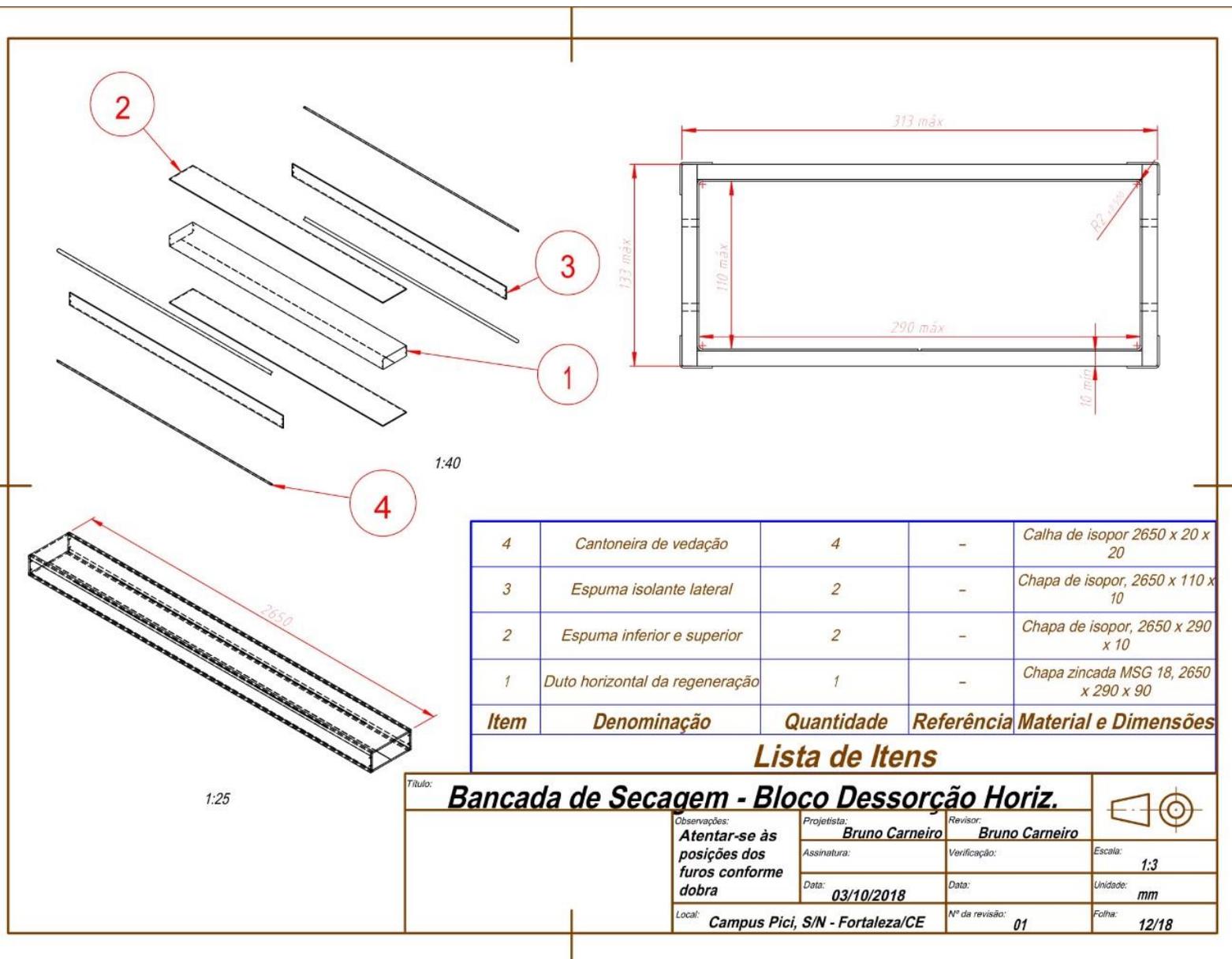


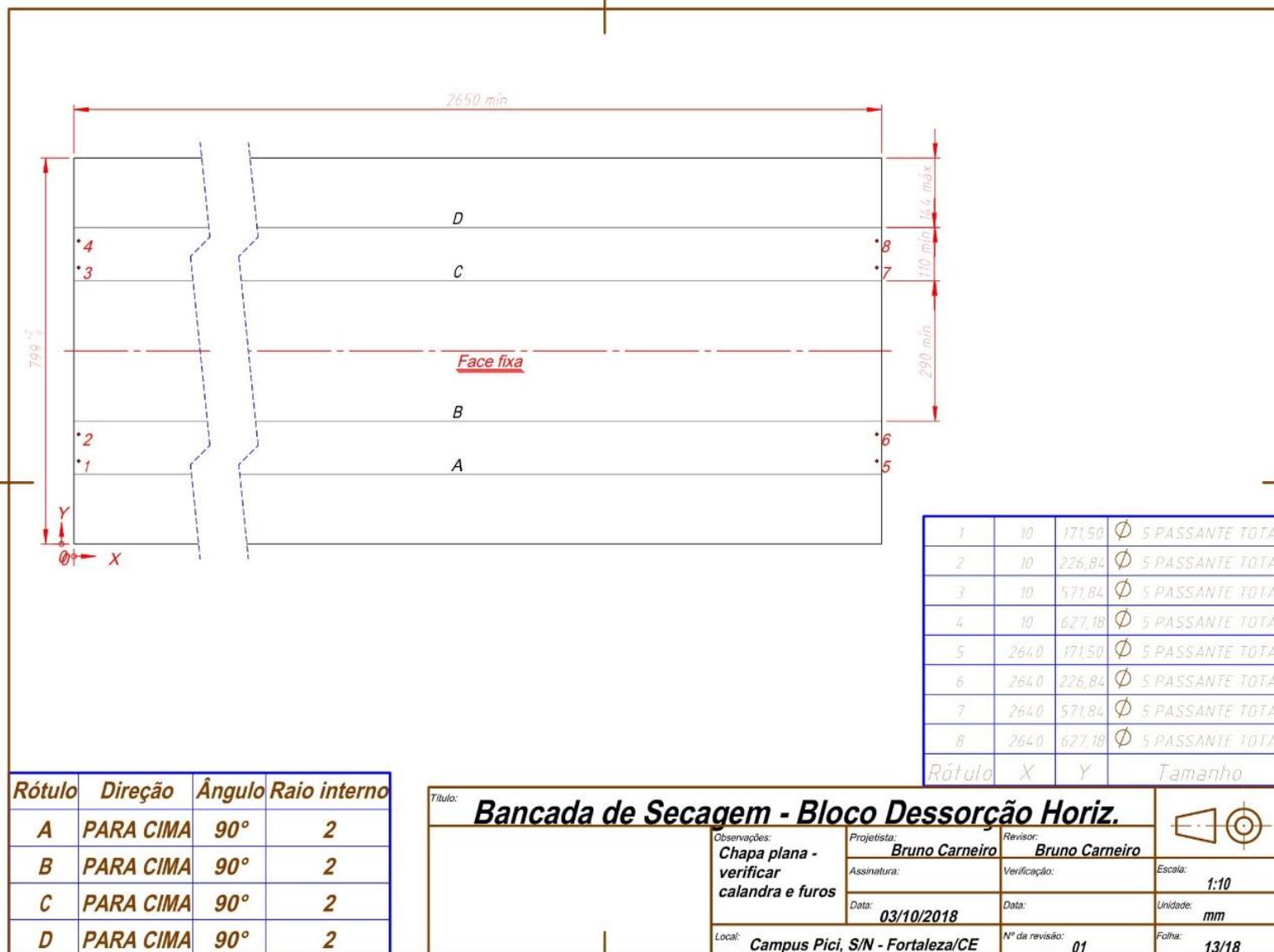


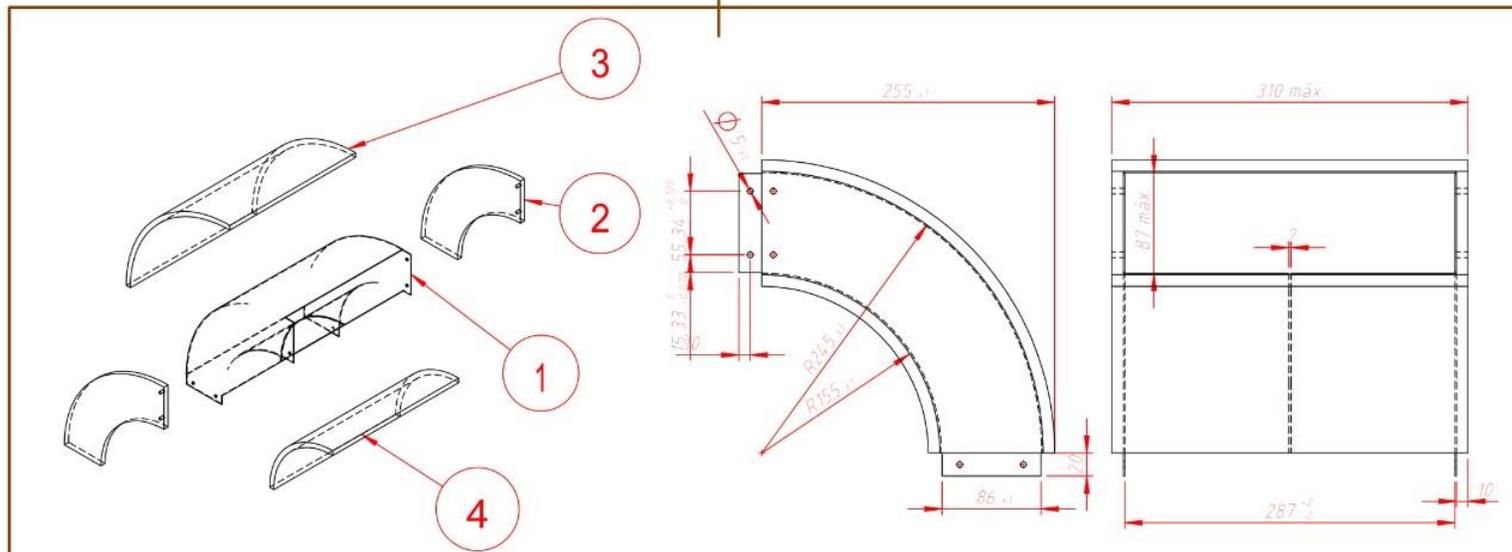
Título: Bancada de Secagem - Conexão Duto Roda		
Observações: Verificar dobra e furos de acordo com abertura da roda	Projetista: Bruno Carneiro Assinatura: Data: 03/10/2018	
Local: Campus Pici, S/N - Fortaleza/CE		Escala: 1:4 Unidade: mm Folha: 10/18



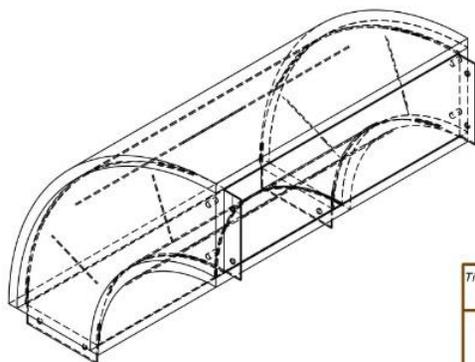
Título:		Bancada de Secagem - Conexão planificada		
Observações:	Projeto:	Revisor:	Escala:	
Verificar dobra de acordo com abertura da roda	Assinatura:	Bruno Carneiro	Bruno Carneiro	1:4
	Data:	03/10/2018	Verificação:	Unidade: mm
Local:	Campus Pici, S/N - Fortaleza/CE	Nº da revisão:	01	Folha: 11/18







1:10



1:10

4	Espuma isolante inferior	1	-	Calha de isopor 10mm
3	Espuma isolante superior	1	-	Calha de isopor 10mm
2	Espuma isolante lateral	2	-	Calha de isopor 10mm
1	Duto curvado 90°	1	-	Chapa zincada MSG 18
Item	Denominação	Quantidade	Referência	Material e Dimensões
Lista de Itens				

Título:

Bancada de Secagem - Duto de Curva de 90°



Observações:

Atentar-se às posições dos furos conforme dobras

Projetista: **Bruno Carneiro**

Assinatura:

Data: **03/10/2018**

Local:

Campus Pici, S/N - Fortaleza/CE

Revisor:

Bruno Carneiro

Verificação:

Data:

Nº da revisão: **01**

Escala:

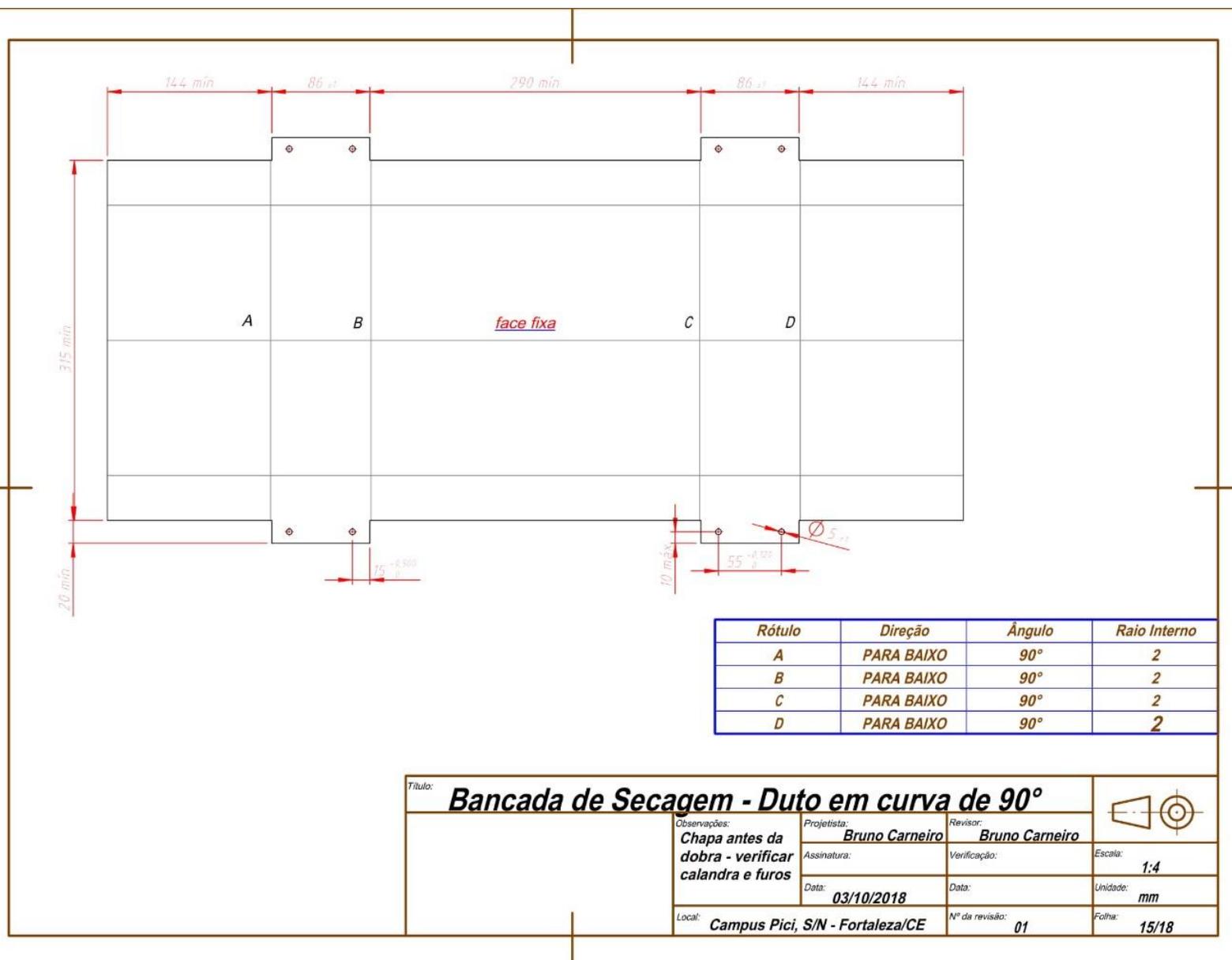
1:5

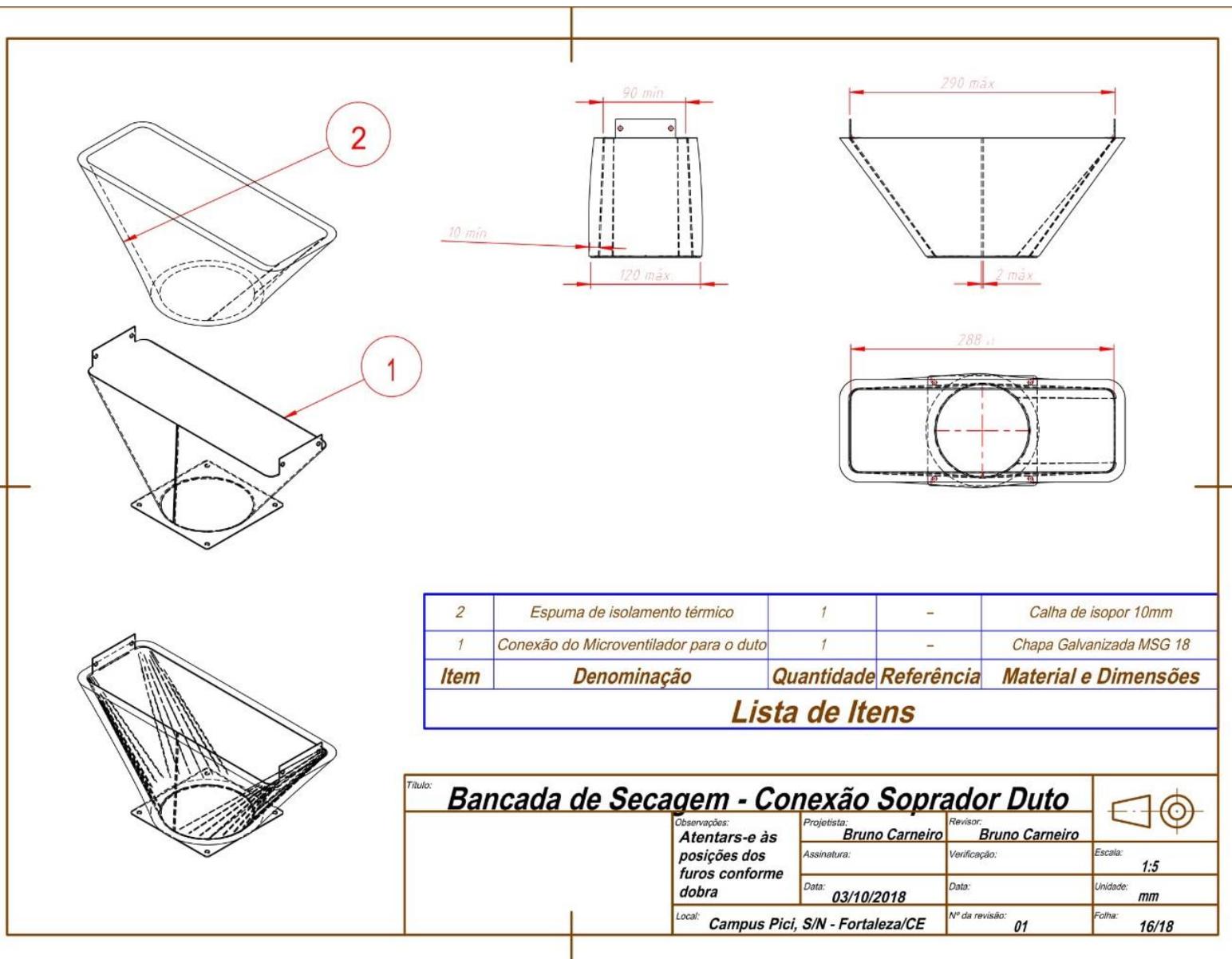
Unidade:

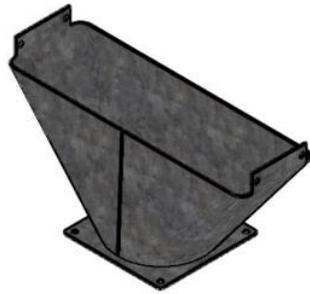
mm

Folha:

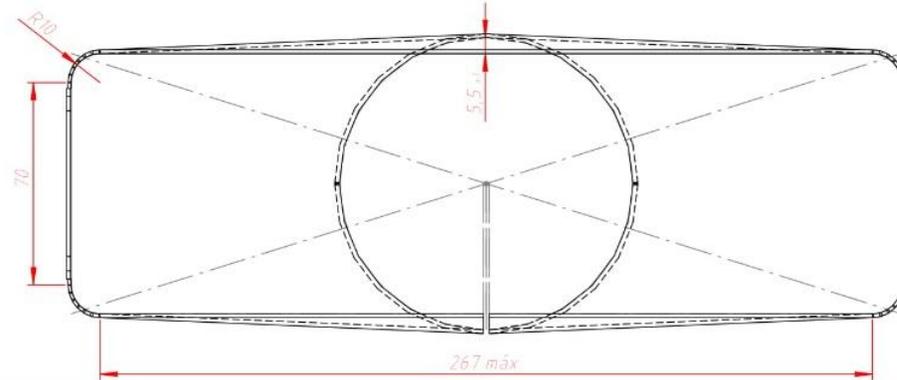
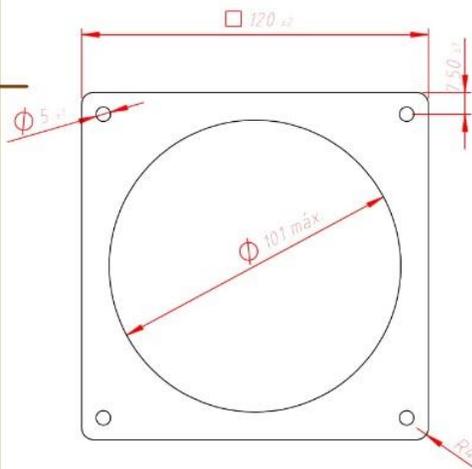
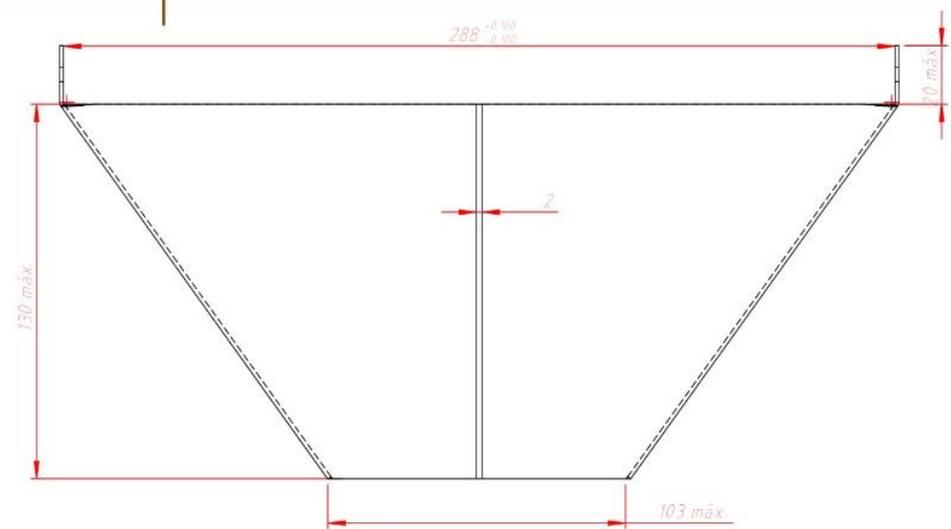
14/18







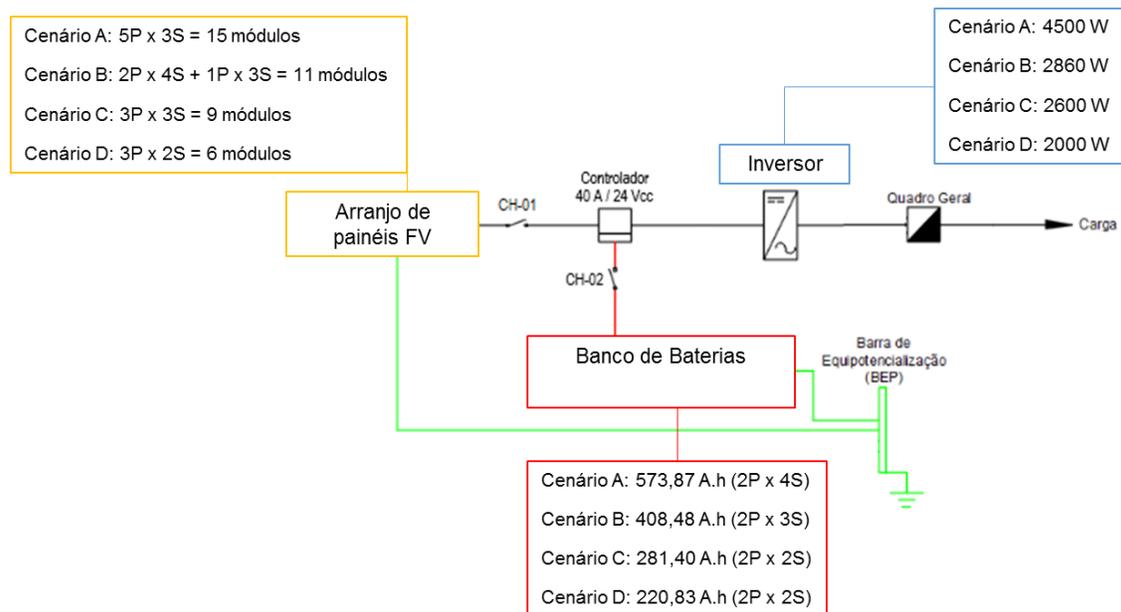
1:5



Título: Bancada de Secagem - Conexão Soprador Duto			
Observações: Versão sem a espuma isolante	Projetista: Bruno Carneiro	Revisor: Bruno Carneiro	
	Assinatura:	Verificação:	Escala: 1:2
	Data: 03/10/2018	Data:	Unidade: mm
Local: Campus Pici, S/N - Fortaleza/CE	N° da revisão: 01	Folha: 17/18	

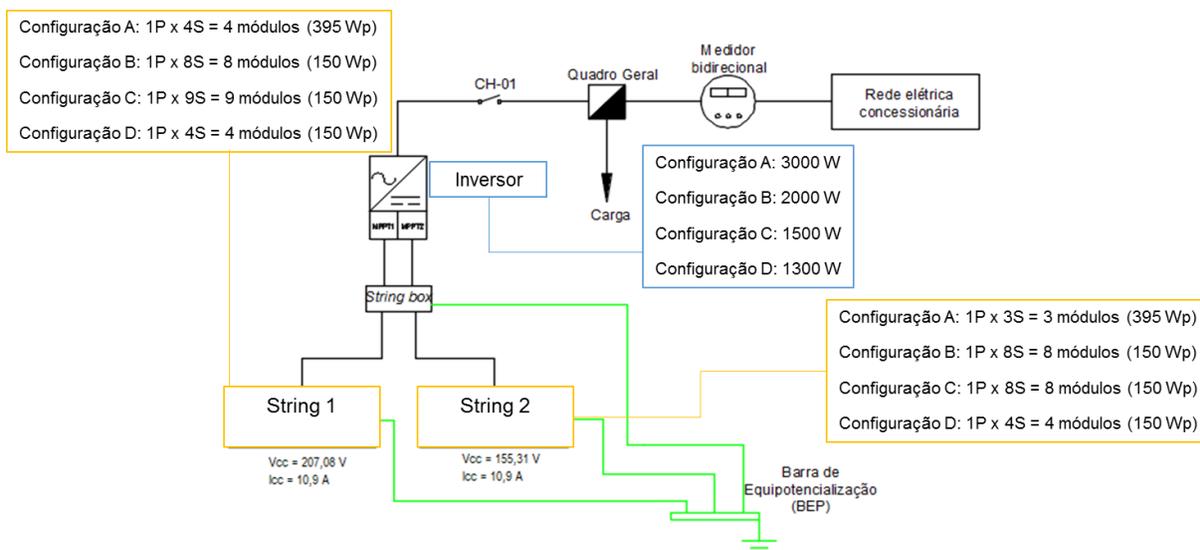
APÊNDICE B – DIAGRAMA DE LIGAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO E CONECTADO À REDE AO SISTEMA DE SECAGEM

Figura 43 – Diagrama fotovoltaico isolado para a bancada de secagem de banana



Fonte: Autor.

Figura 44 – Diagrama fotovoltaico conectado à rede para a bancada de secagem de banana



Fonte: Autor.

APÊNDICE C – ALGORITMO EM VB DE AQUISIÇÃO DE DADOS POR COMUNICAÇÃO SERIAL VIA PLANILHA DA BALANÇA E DO SENSOR DE TEMPERATURA E VELOCIDADE DO AR

```

Public Sub ComTest()
    Dim i As Integer, intPortID As Integer
    Dim lngStatus As Long
    Dim strData As String

    Application.ScreenUpdating = False

    i = 11
    strData = "s"

    Sheet1.Range("X11:X33").ClearContents
    Sheet1.Range("AA10").Value = ""
    Sheet1.Range("AB10").Value = ""

    ' Abre a porta COM
    For intPortID = 1 To MAX_PORTS
        ' Inicialização porta COMM padrão baud=9600 parity=N databit=8 stop=1
        lngStatus = CommOpen(intPortID, "COM" & CStr(intPortID), "baud=9600 parity=N data=8 stop=1")

        If lngStatus = 0 Then
            ' Escreve os dados para a porta serial para confirmar se um dispositivo está conectado
            lngStatus = CommWrite(intPortID, strData)

            If lngStatus = Len(strData) Then
                Sheet1.Cells(i, 24).Value = "COM" & CStr(intPortID)
                i = i + 1
                CommClose (intPortID)
            End If
        End If
    Next

    With Sheet1.Range("AA10").Validation
        .Delete
    End With

```

```

        .Add      Type:=xlValidateList,      AlertStyle:=xlValidAlertStop,      Operator:=xlBetween,
Formula1:="=$X$11:$X$" & Sheet1.Range("X9").Value + 11
    End With

```

```

    With Sheet1.Range("AB10").Validation
        .Delete
        .Add      Type:=xlValidateList,      AlertStyle:=xlValidAlertStop,      Operator:=xlBetween,
Formula1:="=$X$11:$X$" & Sheet1.Range("X9").Value + 11
    End With

```

```

    MsgBox "Please Select COM Port."

```

```

    Application.ScreenUpdating = True

```

```

End Sub

```

```

Public Sub Connect()

```

```

    Dim strSettings_FMA As String, strData_FMA As String
    Dim intPortID_FMA As Integer
    Dim lngStatus_FMA As Long

```

```

    Dim strSettings_UX As String, strData_UX As String
    Dim intPortID_UX As Integer
    Dim lngStatus_UX As Long

```

```

'Declaração Formatação string FMA

```

```

    Dim strDoisPontos As String
    Dim strPontoVirgula As String
    Dim strVelocLeft As String
    Dim strTempLeft As String

```

```

    Dim posPrimeiroDoisPontos As Integer
    Dim posSegundoDoisPontos As Integer
    Dim posPrimeiroPontoVirgula As Integer
    Dim posSegundoPontoVirgula As Integer

```

```
Dim velFpmBruto As String  
Dim TempF10Bruto As String
```

```
Dim velocidade_fpm As Double  
Dim velocidade_ms As Double  
Dim temp_F10 As Double  
Dim temp_C As Double
```

```
strDoisPontos = ":"  
strPontoVirgula = ";"
```

```
strData_FMA = ""  
strSettings_FMA = ""  
Sheet1.Range("AA19").Value = ""
```

```
'Declaração Formatação string UX
```

```
Dim strDataTrim As String
```

```
Dim tira_chave_esq As String  
Dim tira_chave_dir As String  
Dim tira_ponto As String  
Dim tira_g As String  
Dim bota_nada As String  
Dim bota_virgula As String
```

```
Dim seTemPonto As Boolean
```

```
Dim strSemChaveEsq As String  
Dim strSemChave As String  
Dim strSemG As String  
Dim strLimpo As String
```

```
Dim DbIMassa As Double
```

```
tira_chave_esq = "["
```

```

tira_chave_dir = "]"
tira_ponto = "."
tira_g = "g"
bota_nada = ""
bota_virgula = ","
strData_UX = ""
strSettings_UX = ""
Sheet1.Range("AB19").Value = ""

With Sheet1
    If .Range("AA16").Value = True And .Range("AB16").Value = True Then
        strSettings_FMA = "baud=" & Left(.Range("AA11").Value, Len(.Range("AA11").Value) - 3) & "
parity=" & Left(.Range("AA13").Value, 1) & " data=" & .Range("AA12").Value & " stop=" &
.Range("AA14").Value
        intPortID_FMA = Mid(.Range("AA10").Value, 4, Len(.Range("AA10").Value) - 3)

        lngStatus_FMA = CommOpen(intPortID_FMA, "COM" & CStr(intPortID_FMA), strSettings_FMA)

        strSettings_UX = "baud=" & Left(.Range("AB11").Value, Len(.Range("AB11").Value) - 3) & "
parity=" & Left(.Range("AB13").Value, 1) & " data=" & .Range("AB12").Value & " stop=" &
.Range("AB14").Value
        intPortID_UX = Mid(.Range("AB10").Value, 4, Len(.Range("AB10").Value) - 3)

        lngStatus_UX = CommOpen(intPortID_UX, "COM" & CStr(intPortID_UX), strSettings_UX)

    If lngStatus_FMA = 0 And lngStatus_UX = 0 Then
        .Range("AA17").Value = 1
        .Range("AB17").Value = 1
        Do While .Range("AA17").Value = 1 And .Range("AB17").Value = 1
            lngStatus_FMA = CommRead(intPortID_FMA, strData_FMA, 1)
            If lngStatus_FMA > 0 Then
                On Error Resume Next

                .Range("AA19").Value = Trim(strData_FMA)
                If .Range("AA19").Value = "" Then
                    Sheet1.Range("R" & .Range("C2") - 1).Value = Sheet1.Range("R" & .Range("C2") -
2).Value

```

End If

If Len(Sheet1.Range("AA19")) - Len(Replace(Sheet1.Range("AA19"), strPontoVirgula, ""))

= 2 Then

 posPrimeiroPontoVirgula = InStr(Sheet1.Range("AA19"), strPontoVirgula)

Else: On Error Resume Next

GoSub CheckErrorInStr

Debug.Print Sheet1.Range("AA19")

End If

If Len(Sheet1.Range("AA19")) - Len(Replace(Sheet1.Range("AA19"), strDoisPontos, "")) =

2 Then

 posSegundoDoisPontos = InStr(5, Sheet1.Range("AA19"), strDoisPontos)

Else: On Error Resume Next

GoSub CheckErrorInStr

Debug.Print Sheet1.Range("AA19")

End If

If .Range("AA19").Value = "%--> Unsupported command!" Then

 On Error Resume Next

 GoSub CheckErrorInStr

 Debug.Print Sheet1.Range("AA19")

End If

If Left(Sheet1.Range("AA19"), posPrimeiroPontoVirgula - 1) <> "" Then

 strVelocLeft = Left(Sheet1.Range("AA19"), posPrimeiroPontoVirgula - 1)

Else: GoSub CheckErrorLeft

Debug.Print Sheet1.Range("AA19")

Exit Sub

End If

 strTempLeft = Right(Sheet1.Range("AA19"), Len(Sheet1.Range("AA19")) -
posSegundoDoisPontos) '888;

posPrimeiroDoisPontos = InStr(Sheet1.Range("AA19"), strDoisPontos)

posSegundoPontoVirgula = Len(strTempLeft)

```
velFpmBruto = Right(strVelocLeft, Len(strVelocLeft) - posPrimeiroDoisPontos)
If Left(strTempLeft, posSegundoPontoVirgula - 2) > 0 Then
TempF10Bruto = Left(strTempLeft, posSegundoPontoVirgula - 2)
Else: GoSub CheckErrorCDBl
Debug.Print strTempLeft
Exit Sub
End If

If IsNumeric(velFpmBruto) Then
    velocidade_fpm = CDBl(velFpmBruto)
Else: GoSub CheckErrorCDBl
Debug.Print velFpmBruto
Exit Sub
End If

velocidade_ms = 5.1 * velocidade_fpm / 1000
Sheet1.Range("S" & .Range("C2") - 1).Value = velocidade_ms

If IsNumeric(TempF10Bruto) Then
    temp_F10 = CDBl(TempF10Bruto)
Else: GoSub CheckErrorCDBl
Debug.Print TempF10Bruto
Exit Sub
End If

If Sheet1.Range("V12") = 1 Or gUnitsFahrenheit = True Then
Sheet1.Range("R" & .Range("C2") - 1).Value = Round((temp_F10 / 10), 2)
Else
temp_C = ((temp_F10 / 10) - 32) / 1.8
Sheet1.Range("R" & .Range("C2") - 1).Value = Round(temp_C, 2)
End If
End If

IngStatus_UX = CommRead(intPortID_UX, strData_UX, 1)
If IngStatus_UX > 0 Then
    On Error Resume Next
    .Range("AB19").Value = .Range("AB19").Value & strData_UX
```

```
strDataTrim = Trim(.Range("AB19").Value)
```

```
If Len(strDataTrim) >= 7 And InStr(strDataTrim, tira_ponto) <> 0 Then
    strSemChaveEsq = Replace(.Range("AB19"), tira_chave_esq, bota_nada)
    strSemChave = Replace(strSemChaveEsq, tira_chave_dir, bota_nada)
    strSemG = Replace(strSemChave, tira_g, bota_nada)
    strLimpo = Replace(strSemG, tira_ponto, bota_virgula)
    DblMassa = CDb(Trim(strLimpo))
    .Range("T" & .Range("C2") - 1).Value = DblMassa
Elseif Len(strDataTrim) >= 7 And InStr(strDataTrim, tira_ponto) = 0 Then
    strSemChaveEsq = Replace(.Range("AB19"), tira_chave_esq, bota_nada)
    strSemChave = Replace(strSemChaveEsq, tira_chave_dir, bota_nada)
    strSemG = Replace(strSemChave, tira_g, bota_nada)
    DblMassa = CDb(Trim(strSemG))
    .Range("T" & .Range("C2") - 1).Value = Round((DblMassa / 100), 2)
End If
```

```
End If
```

```
DoEvents
```

```
Loop
```

```
Elseif lngStatus_FMA <> 0 Then
```

```
    lngStatus_FMA = CommGetError(strError_FMA)
```

```
    MsgBox "Connection Failed in FMA1001A-V1. " & strError_FMA
```

```
Elseif lngStatus_UX <> 0 Then
```

```
    lngStatus_UX = CommGetError(strError_UX)
```

```
    MsgBox "Connection Failed in UX6200H. " & strError_UX
```

```
End If
```

```
Else
```

```
    MsgBox "Please Ensure All COM Setting Are Set And COM Port Selected."
```

```
End If
```

```
End With
```

```
CheckErrorInStr:
```

```
    lngStatus_FMA = CommRead(intPortID_FMA, strData_FMA, 1)
```

```
    If lngStatus_FMA > 0 Then
```

```

Sheet1.Range("AA19").Value = Trim(strData_FMA)
If Sheet1.Range("AA19").Value = "" Then
    Sheet1.Range("R" & Sheet1.Range("C2") - 1).Value = Sheet1.Range("R" &
Sheet1.Range("C2") - 2).Value
    End If
End If
Return

```

CheckErrorLeft:

```

IngStatus_FMA = CommRead(intPortID_FMA, strData_FMA, 1)
If IngStatus_FMA > 0 Then
    Sheet1.Range("AA19").Value = Trim(strData_FMA)
    If Sheet1.Range("AA19").Value = "" Then
        Sheet1.Range("R" & Sheet1.Range("C2") - 1).Value = Sheet1.Range("R" &
Sheet1.Range("C2") - 2).Value
        End If
    If Len(Sheet1.Range("AA19")) - Len(Replace(Sheet1.Range("AA19"), strPontoVirgula, ""))
= 2 Then
        posPrimeiroPontoVirgula = InStr(Sheet1.Range("AA19"), strPontoVirgula)
    Else: GoSub CheckErrorInStr
        Debug.Print Sheet1.Range("AA19")
    End If

    If Len(Sheet1.Range("AA19")) - Len(Replace(Sheet1.Range("AA19"), strDoisPontos, "")) =
2 Then
        posSegundoDoisPontos = InStr(5, Sheet1.Range("AA19"), strDoisPontos)
    Else: GoSub CheckErrorInStr
        Debug.Print Sheet1.Range("AA19")
    End If
End If
Return

```

CheckErrorCDBl:

```

IngStatus_FMA = CommRead(intPortID_FMA, strData_FMA, 1)
If IngStatus_FMA > 0 Then
    Sheet1.Range("AA19").Value = Trim(strData_FMA)
    If Sheet1.Range("AA19").Value = "" Then

```

```

        Sheet1.Range("R" & Sheet1.Range("C2") - 1).Value = Sheet1.Range("R" &
Sheet1.Range("C2") - 2).Value
    End If

    If Len(Sheet1.Range("AA19")) - Len(Replace(Sheet1.Range("AA19"), strPontoVirgula, ""))
= 2 Then
        posPrimeiroPontoVirgula = InStr(Sheet1.Range("AA19"), strPontoVirgula)
    Else: GoSub CheckErrorInStr
    Debug.Print Sheet1.Range("AA19")
    End If

    If Len(Sheet1.Range("AA19")) - Len(Replace(Sheet1.Range("AA19"), strDoisPontos, "")) =
2 Then
        posSegundoDoisPontos = InStr(5, Sheet1.Range("AA19"), strDoisPontos)
    Else: GoSub CheckErrorInStr
    Debug.Print Sheet1.Range("AA19")
    End If

    If Left(Sheet1.Range("AA19"), posPrimeiroPontoVirgula - 1) <> "" Then
        strVelocLeft = Left(Sheet1.Range("AA19"), posPrimeiroPontoVirgula - 1)
    Else: GoSub CheckErrorLeft
    Debug.Print Sheet1.Range("AA19")
    End If

    strTempLeft = Right(Sheet1.Range("AA19"), Len(Sheet1.Range("AA19")) -
posSegundoDoisPontos)

    posPrimeiroDoisPontos = InStr(Sheet1.Range("AA19"), strDoisPontos)
    posSegundoPontoVirgula = Len(strTempLeft)

    velFpmBruto = Right(strVelocLeft, Len(strVelocLeft) - posPrimeiroDoisPontos)
    If Left(strTempLeft, posSegundoPontoVirgula - 2) > 0 Then
        TempF10Bruto = Left(strTempLeft, posSegundoPontoVirgula - 2)
    End If
End If
Return

```

End Sub

Public Sub Disconnect()

Dim intPortID_FMA As Integer

Dim lngStatus_FMA As Long

Dim intPortID_UX As Integer

Dim lngStatus_UX As Long

With Sheet1

If .Range("AA10").Value <> "" And .Range("AB10").Value <> "" Then

intPortID_FMA = Mid(.Range("AA10").Value, 4, Len(.Range("AA10").Value) - 3)

.Range("AA17").Value = 0

lngStatus_FMA = CommClose(intPortID_FMA)

intPortID_UX = Mid(.Range("AB10").Value, 4, Len(.Range("AB10").Value) - 3)

.Range("AB17").Value = 0

lngStatus_UX = CommClose(intPortID_UX)

If lngStatus_FMA = 0 And lngStatus_UX = 0 Then

Elseif lngStatus_FMA <> 0 Then

MsgBox "Could Not Close " & .Range("AA10").Value & ". " & strError_FMA

Elseif lngStatus_UX <> 0 Then

MsgBox "Could Not Close " & .Range("AB10").Value & ". " & strError_UX

End If

Else

MsgBox "COM Port Not Selected!"

End If

End With

End Sub

Public Sub Send()

Dim intPortID_FMA As Integer

Dim strData_FMA As String

Dim lngStatus_FMA As Long

```
Dim intPortID_UX As Integer
Dim strData_UX As String
Dim lngStatus_UX As Long
```

```
Sheet1.Range("AB19").Value = ""
```

```
With Sheet1
```

```
  If .Range("AA10").Value <> "" And .Range("AB10").Value <> "" Then
```

```
    strData_FMA = Sheet1.Range("AA18").Value & vbCrLf
```

```
    intPortID_FMA = Mid(.Range("AA10").Value, 4, Len(.Range("AA10").Value) - 3)
```

```
    lngStatus_FMA = CommWrite(intPortID_FMA, strData_FMA)
```

```
    strData_UX = Sheet1.Range("AB18").Value & vbCrLf
```

```
    intPortID_UX = Mid(.Range("AB10").Value, 4, Len(.Range("AB10").Value) - 3)
```

```
    lngStatus_UX = CommWrite(intPortID_UX, strData_UX)
```

```
  If lngStatus_FMA <> Len(strData_FMA) Then
```

```
    lngStatus_FMA = CommGetError(strError_FMA)
```

```
    MsgBox "Could Not Send Data from " & .Range("AA10").Value & ". " & strError_FMA
```

```
  End If
```

```
  If lngStatus_UX <> Len(strData_UX) Then
```

```
    lngStatus_UX = CommGetError(strError_UX)
```

```
    MsgBox "Could Not Send Data from " & .Range("AB10").Value & ". " & strError_UX
```

```
  End If
```

```
  ElseIf Range("AA10").Value = "" Then
```

```
    MsgBox "FMA 1001A-V1 Port Not Selected!"
```

```
  ElseIf Range("AB10").Value = "" Then
```

```
    MsgBox "UX6200H Port Not Selected!"
```

```
  End If
```

```
End With
```

```
End Sub
```

APÊNDICE D – ALGORITMO EM VB DE AQUISIÇÃO DE DADOS POR COMUNICAÇÃO USB VIA ARDUINO DO SENSOR NÃO-INVASIVO DE CORRENTE ALTERNADA

```
#include <EmonLib.h>

EnergyMonitor emon1;

double rede = 220; //Tensao da rede eletrica

int pino_sct = A0; //Pino do sensor SCT

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  emon1.current(pino_sct, 60); //Pino, calibracao - Cur Const= Ratio/BurdenR. 2000/33 = 60
}

void loop()
{
  double Irms = emon1.calcIrms(1480); //Calcula a corrente
  Serial.print("Corrente : "); //Mostra o valor da corrente no serial monitor e display
  Serial.print(Irms); // Irms
  Serial.println(" A");
  double potencia = Irms * rede;
  Serial.print(" Potência : "); //Mostra o valor da corrente no serial monitor e display
  Serial.println(potencia); // Irms

  delay(1000);
}
```

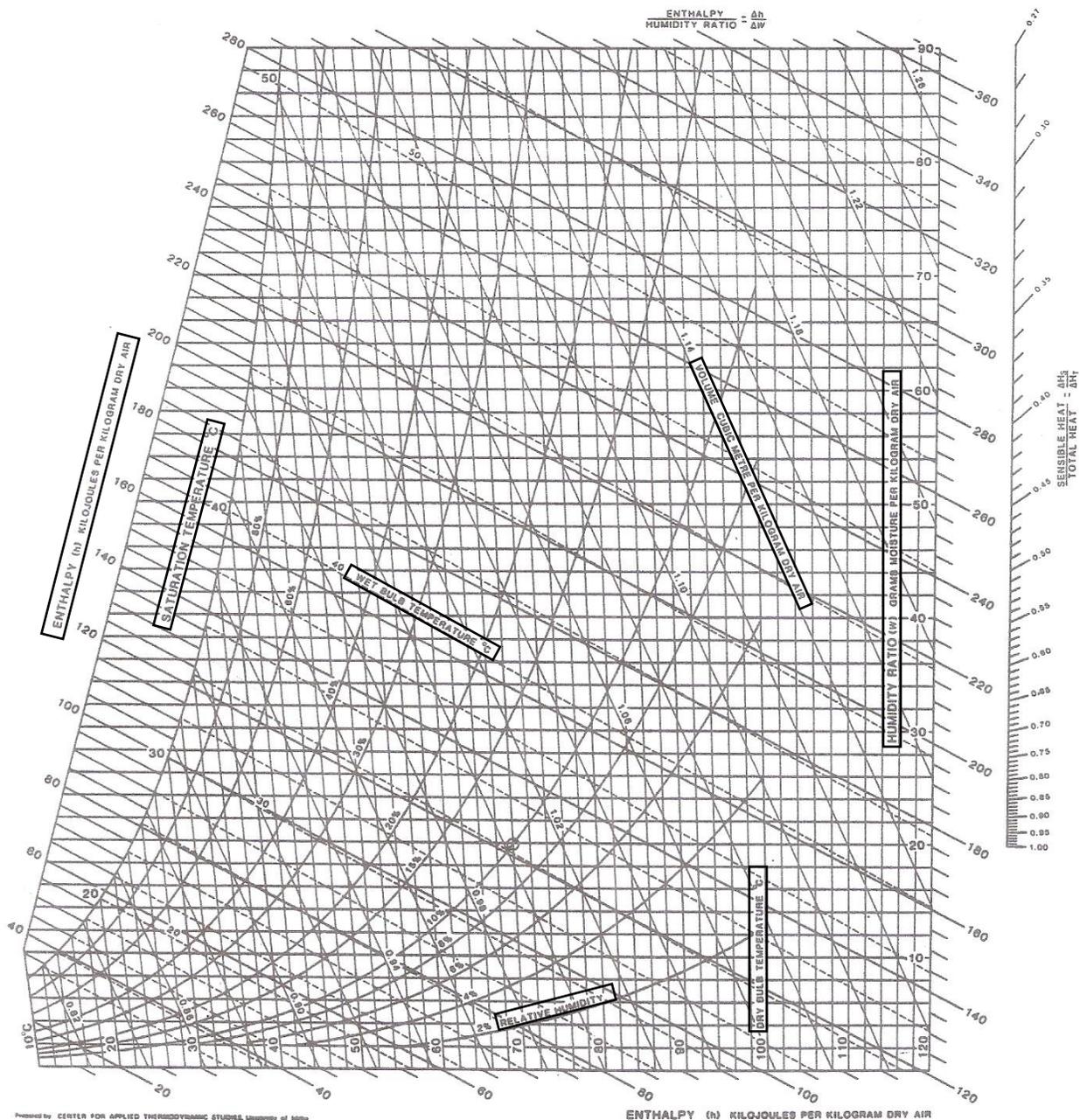
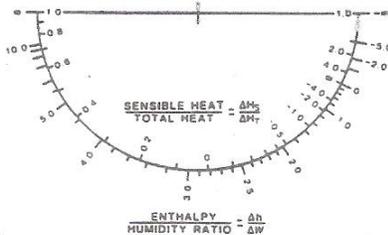
ANEXO

ANEXO A – CARTA PSICROMÉTRICA ASHRAE N° 3

ASHRAE PSYCHROMETRIC CHART NO.3
 HIGH TEMPERATURE 10°C to 120°C SEA LEVEL
 BAROMETRIC PRESSURE 101.325 kPa



COPYRIGHT 1981
 AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC.



Prepared by CENTER FOR APPLIED THERMODYNAMIC STUDIES, University of Idaho

ENTHALPY (h) KILOJOULES PER KILOGRAM DRY AIR

TBS = Temperatura de bulbo seco [$^{\circ}\text{C}$ ou K]. É a real temperatura do ar úmido em repouso, isto é, a temperatura do ar medida por um termômetro (ou um sensor transdutor) não sujeito a evaporação, condensação ou radiação e quando a velocidade do ar impactando o sensor de temperatura não é tão alto para que a energia de conversão do impacto no sensor aumente o valor de leitura.

TBU = Temperatura de bulbo úmido [$^{\circ}\text{C}$ ou K]. Também chamada de temperatura de saturação adiabática, é a temperatura de saturação para o qual o ar úmido pode ser adiabaticamente resfriado pela evaporação de H_2O (líquido ou gelo) à mesma temperatura no ar úmido. A temperatura de bulbo psicrométrica para a mistura de ar seco e vapor de água é a temperatura medida por um termômetro convencional que tem seu elemento sensor coberto com um chumaço de algodão macio encharcado com água.

TPO = Temperatura de ponto de orvalho [$^{\circ}\text{C}$ ou K]. É a temperatura no qual a fase de vapor de uma substância estará saturada sem mudança na pressão, isto é, a temperatura de saturação correspondente à pressão de vapor real.

ϕ = Umidade relativa do ar [%]. É a razão da pressão real de vapor de água para a pressão saturada de vapor de água na mesma temperatura de bulbo seco.

μ = Umidade absoluta do ar [$\text{kg}_v/\text{kg}_{\text{ar}}$]. É a razão de massa de vapor de água para a massa do ar seco em um volume de ar úmido.

h = Entalpia específica [kJ/kg]. É o total de energia contida no ar sob as condições de pressão, temperatura e umidade absoluta do ar. A entalpia do ar úmido é a soma dos componentes de entalpia do ar seco $h_{\text{ar seco}}$ e o produto da entalpia do vapor de água saturado $h_{\text{vap. sat.}}$ com a umidade absoluta do ar μ . É representada pela seguinte relação:

$$h = h_{\text{ar seco}} + \mu \cdot h_{\text{vap. sat.}} \quad (8)$$

v = Volume específico da mistura [m^3/kg]. É o volume por unidade de massa de ar seco.

P_{BAR} = Pressão barométrica [Pa]. É a pressão medida com um barômetro, também chamada de pressão atmosférica. É a soma da pressão parcial do ar seco e a pressão parcial do vapor de água.

ANEXO B – ROTEIRO DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÔNOMO E CONECTADO À REDE

A maneira mais tradicional para se determinar a demanda de uma unidade consumidora é somar as energias consumidas por cada equipamento em uma planilha, levando em consideração os equipamentos, a potência elétrica, o tempo diário de funcionamento e os dias de utilização por semana, para que se disponha de dados diários de energia consumida em Wh.dia (GTES, 2014). Para o sistema da bancada de secagem, a Tabela 3 apresenta a relação dos equipamentos elétricos com seus respectivos consumo e tempo de funcionamento. O consumo diário é determinado por:

$$E_{CA} = \sum n_{\text{eqp}} \cdot \text{Pot}_{CA} \cdot \Delta t \quad (9)$$

$$E_{CC} = \sum n_{\text{eqp}} \cdot \text{Pot}_{CC} \cdot \Delta t \quad (10)$$

Nos quais E_{CA} e E_{CC} representam o consumo diário de energia em Wh dos equipamentos em corrente alternada e corrente contínua, respectivamente; n_{eqp} é o número de utensílios do mesmo equipamento; Pot_{CA} e Pot_{CC} são as respectivas potências nominais em W do equipamento listado em corrente alternada e contínua, respectivamente; e Δt é o intervalo de uso do equipamento em uma base horária. Para contabilizar a demanda em uma base mensal ou anual, basta multiplicar o consumo diário pelo número médio de dias de utilização do equipamento por mês.

Um importante fator a ser observado é o tipo de alimentação das cargas - corrente contínua ou alternada. A utilização de equipamentos CC dispensa a utilização do inversor, porém, a disponibilidade comercial desse tipo de equipamento é menor, seus custos são mais elevados, e, muitas vezes, sua qualidade é inferior à dos equipamentos equivalentes convencionais em CA. Caso o sistema atenda cargas CA, o consumo diário deve ser dividido por um fator decimal representativo da eficiência média do inversor. Caso o fabricante indique valores de 90% de eficiência, bastante comuns, o consumo da

tabela deve ser dividido por 0,9. Além disso, este deve também ser capaz de suportar os picos de partida requeridos por determinadas cargas, se for o caso (GTES, 2014).

Um gerador fotovoltaico tem suas características elétricas dependentes basicamente da irradiância e da temperatura nos módulos. A irradiância pode variar significativamente em curtos intervalos de tempo, especialmente em dias com nuvens, mas a variação da temperatura é menor graças à capacidade térmica dos módulos.

Nas estimativas de produção de energia elétrica, há uma forte linearidade entre a produção de energia e a irradiação horária, podendo adotar um conceito para o tempo de acúmulo eficiente de energia solar ao longo de um dia: o número de Horas de Sol Pleno (HSP). Esta grandeza reflete o número de horas em que a irradiância solar deve permanecer constante e igual a 1 kW/m² ao longo de um dado dia (GTES, 2014; Souza, 2017). O HSP é determinado por:

$$HSP = \frac{H_T}{P \cdot \eta \cdot A_{irradiada}} \quad (11)$$

Na qual H_T é a irradiância solar incidente na região durante o dia em Wh/m².dia - kWh/m² em base mensal, P é a potência nominal do painel no local em W, η é a eficiência de conversão da energia solar em energia elétrica e $A_{irradiada}$ é a área do painel que está exposta a radiação solar em m².

Os sistemas fotovoltaicos autônomo e conectado à rede apresentam diferentes abordagens de dimensionamento, uma vez o sistema *off-grid* possui componentes não existentes em arranjos *grid-tie* como o controlador de carga e o banco de bateria. Portanto são descritos em tópicos diferentes.

Sistema FV Autônomo

A base do dimensionamento de sistemas isolados é considerar que o sistema deve gerar mais eletricidade do que o limite estabelecido para consumo. Entre as metodologias de dimensionamento da geração fotovoltaica conforme os sistemas isolados, o método do mês crítico é o preferencial e sugerido pela GTES/CRESESB/CEPEL (2014) e consiste na realização do dimensionamento considerando um balanço de energia durante o período do ano no qual ocorrem as condições médias mensais mais desfavoráveis para o sistema.

Para uma carga fixa, o dimensionamento pode ser feito simplesmente com base no mês de pior irradiação solar no ano. A desvantagem do método do mês crítico é que este não otimiza energeticamente a instalação, proporcionando um excesso de energia nos meses mais favoráveis (GTES/CRESESB/CEPEL, 2014).

A demanda total de energia que o grupo de painéis deve cobrir, ou a energia ativa conforme Clemente (2018), ainda consta da compensação das perdas relacionadas às baterias, inversores de corrente, controladores de carga, calculada com o somatório das demandas em corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA). Para calcular a energia ativa necessária em base diária (Eq. 12), leva-se em conta o tipo de carga do sistema em corrente alternada e em corrente contínua e a eficiência dos elementos que participam do processo de armazenamento e condicionamento de potência.

$$E_{\text{ativa, OG}} = \left[\frac{E_{\text{CC}}}{\eta_{\text{bat}}} + \left(\frac{E_{\text{CA}}}{\eta_{\text{bat}} \cdot \eta_{\text{inv}}} \right) \right] \quad (12)$$

Na qual η_{bat} é a eficiência da bateria – estipulada em 86% segundo a GTES (2014); e η_{inv} é a eficiência do inversor que tem como referência conforme o INMETRO, em seu Requisito de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica, um valor no mínimo de 85% (GTES, 2014).

Para o cálculo da potência diária do Sistema FV Autônomo, deve ser calculado o valor médio diário de energia requerido para cada um dos meses do ano, e a potência necessária para o painel fotovoltaico (P_{FV}), por sua vez, deve ser obtida conforme apresentado abaixo na Eq. 13.

$$P_{FV} = \max_{i=1}^{12} \left(\frac{E_{ativa, OG}}{HSP_i * Red_1 * Red_2} \right) = \max_{i=1}^{12} \left(\frac{E_{ativa, OG}}{HSP_i * A_{irradiada} * \eta_{FV}} \right) \quad (13)$$

Na qual P_{FV} é a potência do painel fotovoltaico; HSP_i são as horas de sol pleno no plano do painel fotovoltaico no mês; Red_1 é o fator de redução (*derating*) da potência dos módulos fotovoltaicos, em relação ao seu valor nominal, englobando os efeitos de degradação, com valor padrão de 0,75. Por último, Red_2 é o fator de redução devido a perdas de fiação, controlador, diodos, com valor em torno de 0,9 (GTES, 2014).

Na ausência de informação acerca dos fatores de redução, a alternativa para definição da potência mínima de geração dos painéis é dada pela segunda parte da equação acima, com a área irradiada $A_{irradiada}$ e a η_{FV} equivalente à eficiência de conversão de um módulo fotovoltaico.

O dimensionamento dos módulos é realizado a partir da relação entre o módulo escolhido para compor o sistema e a potência encontrada. Porém, sua determinação é influenciada conforme o controlador de carga escolhido para o sistema. O controlador de carga evita danos de sobrecarga de energia da bateria através do controle da tensão aplicada no mesmo, impedindo a circulação, no sentido contrário, de corrente vinda na bateria cheia. Sua escolha é importante para a definição do arranjo de painéis, podem ser implementadas em série, ou em série e paralelo, dependendo da tensão e da corrente elétrica desejada.

Com a utilização de um controlador de carga convencional (sem seguimento de ponto de potência máxima), a determinação do número de módulos em série, deve considerar, além da tensão do sistema $V_{sistema}$, a tensão de máxima potência V_{mpTmax} ,

isto é, quando o arranjo de módulos estiver operando na sua maior temperatura de projeto. Para a segurança do sistema, é recomendado que um painel FV alimente uma bateria com uma tensão até 20% acima da nominal se considerada algumas perdas ôhmicas no banco. Para este caso, é inserido o coeficiente na definição do número de módulos em série, sendo arredondado para uma unidade acima em caso de fração e respeitando a tensão máxima de entrada do controlador de carga (GTES, 2014).

$$N_{\text{módulos série}} = \frac{1,2 \cdot V_{\text{sistema}}}{V_{\text{mpTmax}}} \quad (14)$$

Ao se utilizar controladores convencionais, é recomendado que o módulo a ser escolhido tenha o número de células em série adequado à tensão de operação do sistema. A seguir, a partir da potência de pico do painel fotovoltaico P_{FV} e da tensão do sistema, obtém-se a corrente contínua I_{FV} que deve ser gerada pelo módulo.

$$I_{FV} = \frac{P_{FV}}{V_{\text{sistema}}} \quad (15)$$

A corrente para o painel é o valor mínimo da corrente no ponto de máxima potência calculado para o sistema que o gerador fotovoltaico deve fornecer. Através deste parâmetro, calcula-se o número de módulos a serem conectados em paralelo com a corrente de máxima potência I_{mp} na condição padrão de temperatura (STC) de 25°C e 1000 W/m², dado pelo fabricante na Eq. 16 e sendo arredondado para uma unidade acima em fração.

$$N^{\circ} \text{ Módulos paralelo} = \frac{I_{FV}}{I_{mp}} \quad (16)$$

Para um dimensionamento considerando um controlador de carga que possui dispositivos de seguimento de potência máxima (SPPM), o número de módulos em série deve ser tal que a tensão de saída do painel FV esteja dentro da faixa ótima de operação do controlador recomendada pelo fabricante, conforme Eq. 17.

$$\frac{V_{\text{SPPM min}}}{V_{\text{mp, Tmáx}}} < N^{\circ} \text{Módulos}_{\text{série}} < \frac{V_{\text{SPPM máx}}}{V_{\text{mp, Tmin}}} \quad (17)$$

Na qual $V_{\text{SPPM min}}$ e $V_{\text{SPPM máx}}$ são, respectivamente, a mínima e máxima tensão de operação do controlador SPPM. Analogamente, $V_{\text{mp, Tmáx}}$ e $V_{\text{mp, Tmin}}$ são as tensões de máxima potência do módulo FV nas máxima e mínima temperaturas de operação, respectivamente. Estes parâmetros são fornecidos pelo fabricante, porém, na ausência de tais informações, as tensões de máxima potência são encontradas para as temperaturas padrão de teste de -10°C e 75°C , Eq. 18 e Eq. 19, respectivamente, através da tensão de circuito-aberto em STC $V_{\text{oc(STC)}}$ e do coeficiente de temperatura com relação à tensão de circuito aberto do módulo β_{oc} , em $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

$$V_{\text{mp } -10^{\circ}\text{C}} = \left[1 - \left(\frac{35^{\circ}\text{C} \cdot \beta_{\text{oc}}}{100} \right) \right] \cdot V_{\text{oc(STC)}} \quad (18)$$

$$V_{\text{mp } 75^{\circ}\text{C}} = \left[1 + \left(\frac{45^{\circ}\text{C} \cdot \beta_{\text{oc}}}{100} \right) \right] \cdot V_{\text{mp(STC)}} \quad (19)$$

Para o cálculo do número de fileiras em paralelo, Eq. 20, o processo é análogo ao dimensionamento com controladores convencionais, sendo simplificado ao utilizar a potência do arranjo com a potência de pico nominal P_{nominal} do módulo adotado e o número de painéis perfilados em série.

$$N^{\circ} \text{ M\u00f3dulos paralelo} = \frac{P_{FV}}{N_{\text{M\u00f3dulos s\u00e9rie}} \cdot P_{\text{nominal}}} \quad (20)$$

Para confirma\u00e7\u00e3o da adequa\u00e7\u00e3o do painel FV com o controlador, recomenda-se verificar se a raz\u00e3o da \u00e1rea irradiada pela \u00e1rea dos m\u00f3dulos est\u00e1 de acordo com o n\u00famero total de m\u00f3dulos no arranjo (Eq. 21), na multiplica\u00e7\u00e3o dos pain\u00e9is em s\u00e9rie e paralelo (Souza, 2017).

$$N^{\circ} \text{ m\u00f3dulos} = \frac{A_{\text{irradiada}}}{A_{\text{m\u00f3dulo}}} \quad (21)$$

O dimensionamento do controlador de carga deve levar em conta os limites m\u00e1ximos do controlador, seja ele convencional ou SPPM, com rela\u00e7\u00e3o a tens\u00e3o em corrente cont\u00ednua do sistema e aos n\u00edveis de corrente el\u00e9trica, tanto na entrada do painel fotovoltaico quanto na sa\u00edda para as baterias, al\u00e9m do tipo de bateria. Para o dimensionamento da corrente do controlador I_c \u00e9 considerada a corrente de curto circuito do arranjo fotovoltaico I_{sc} , corrente de curto circuito do m\u00f3dulo vezes o n\u00famero de m\u00f3dulos em paralelo, acrescida de um fator m\u00ednimo de seguran\u00e7a de 25%, assumindo que o painel pode receber uma irradi\u00e2ncia de at\u00e9 1250 W/m² em casos extremos (GTES, 2014).

$$I_c = 1,25 \cdot N_{\text{m\u00f3dulos paralelo}} \cdot I_{sc} \quad (22)$$

H\u00e1 modelos de controladores que permitem a opera\u00e7\u00e3o em paralelo. Isso pode ser necess\u00e1rio se a corrente I_c for elevada para apenas um controlador. A Eq. 23 permite

obter o número necessário de controladores em paralelo, considerando a corrente máxima admitida pelo controlador $I_{c,unit}$.

$$N_{\text{módulos paralelo}} = \frac{I_c}{I_{c,unit}} \quad (23)$$

Já a máxima tensão de operação do controlador de carga $V_{c,máx}$ deve sempre ser maior do que a tensão máxima de saída do painel fotovoltaico, a tensão de circuito aberto do módulo na temperatura mínima V_{ocTmin} multiplicado pelo número de módulos em paralelo (Eq. 24).

$$N_{\text{Módulos paralelo}} \cdot V_{ocTmin} < V_{c,máx} \quad (24)$$

Após a definição do arranjo de painéis e do controlador de carga, a etapa seguinte é o dimensionamento do banco de baterias. A etapa é feita com base na relação entre a tensão operacional do sistema e a tensão do equipamento, na sua capacidade e profundidade de descarga. Seu arranjo pode ser em série e/ou em paralelo conforme os dias de autonomia impostos pelo cliente. Para encontrar uma relação entre os dias de autonomia com a disponibilidade de radiação incidente no local em caso de uma indefinição do cliente nesta questão, uma fórmula empírica para sistemas não-críticos pode ser utilizada, sendo apresentada na Eq. 25 (GTES, 2014).

$$N = -0,48 \cdot HSP_{max} + 4,58 \quad (25)$$

Através da demanda de carga corrigida para o sistema FV autônomo no método do mês crítico e da profundidade de descarga do modelo escolhido, Eqs. 32 e 33

calculam as capacidades do banco de baterias CB_{C20} e CBI_{C20} , em Watt.hora e Ampère.hora respectivamente, para o regime padrão de descarga de 20 horas (C20). $E_{ativa\ máx, OG}$ é o valor máximo de consumo do sistema fotovoltaico durante o ano. Os valores típicos de profundidade de descarga P_d utilizados para baterias de ciclo raso são entre 20 e 40% e, para ciclo profundo, de 50 a 80%. A máxima profundidade de descarga depende também de fatores como a radiação solar da região, do tipo de bateria, do regime de utilização, etc. Porém, quanto maior a profundidade de descarga menor sua vida útil da bateria.

$$CB_{C20} = \frac{E_{ativa\ máx, OG} \cdot N}{P_d} \quad (26)$$

$$CBI_{C20} = \frac{CB_{C20}}{V_{sistema}} \quad (27)$$

Se o catálogo do fabricante de bateria não apresentar a capacidade em regime de 20 horas, é preciso observar os parâmetros e fórmulas empíricas de conversão a partir de outros regimes presentes na literatura (GTES, 2014). Após o cálculo da capacidade do sistema de acumulação, a determinação do número de baterias em paralelo é realizada pela razão entre a capacidade do banco calculada CBI_{C20} com a capacidade unitária da bateria escolhida CBI_{bat} no mesmo regime (Eq. 28), conforme a informação dada pelo fornecedor do modelo. Já o número de baterias em série é definido pela razão entre a tensão do sistema e a tensão nominal do modelo do fabricante (Eq. 29).

$$N^{\circ} \text{ Baterias}_{paralelo} = \frac{CBI_{C20}}{CBI_{bat}} \quad (28)$$

$$N^{\circ} \text{ Baterias}_{série} = \frac{V_{sistema}}{V_{bateria}} \quad (29)$$

O dimensionamento do inversor do sistema autônomo, cuja função é transformar a energia em corrente contínua vinda dos módulos para corrente alternada, é feito observando-se a especificação dos equipamentos. A potência do inversor deve ser igual ou superior à potência máxima da curva de carga, isto é, o pico de potência do ciclo diária de consumo de energia. De forma mais conservadora, a potência do inversor deve ser igual ou superior à potência instalada da carga se os equipamentos alimentados pelos painéis possam operar simultaneamente.

Recomenda-se escolher inversores de alta eficiência em toda a sua faixa de operação, com menores perdas do sistema inclusive em sub-operação, compatível com o controlador e com tensão de entrada igual a tensão de corrente contínua do sistema e do banco de bateria e a tensão de saída em corrente alternada conforme a necessidade da carga. É aconselhável a utilização de inversores de forma de onda senoidal, principalmente no caso de cargas eletrônicas que são sensíveis a ondas com distorção harmônica (GTES, 2014).

Por fim, o dimensionamento dos cabos é feito para tanto as correntes contínuas quanto alternada para o sistema monofásico desta bancada, cobrindo o trecho da fiação entre as fileiras do arranjo fotovoltaico, do banco de baterias e as conexões para o controladores e os inversores. É determinada a seção transversal mínima do condutor A_{st} para a corrente nominal I_{nom} correspondente, apresentadas nas Eq. 30, 31, 32 e 33 em CC e CA, respectivamente, a partir de uma queda de tensão máxima admissível aconselhada pela NBR 5410 entre 1% e 3% em sistemas em corrente contínua com tensões nominais de 12, 24 e 48V. Nas instalações de sistemas fotovoltaicos, utiliza-se normalmente condutores de cobre, material que a 20 °C apresenta tipicamente uma resistividade $\sigma_{cobre} = 0,01724 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ e coeficiente de variação com a temperatura de $\alpha_{cobre} = 0,0039/^\circ\text{C}$, que permite determinar a influência da temperatura na resistividade dos materiais (ABNT, 2008).

$$A_{st,CC} = \frac{L_{CC} \cdot I_{nom,CC}}{0,03 \cdot V_{nom} \cdot \sigma_{cobre} \cdot 10^6} \quad (30)$$

$$I_{CC,nom} = \frac{Pot_{CC,nom}}{V_{nom}} \quad (31)$$

$$A_{st,CA} = \frac{L_{CA} \cdot I_{nom,CA} \cdot \cos \varphi}{0,03 \cdot V_{nom} \cdot \sigma_{cobre} \cdot 10^6} \quad (32)$$

$$I_{CA,nom} = \frac{Pot_{CA,nom}}{V_{nom} \cdot \cos \varphi} \quad (33)$$

Assim como no caso das estruturas metálicas de fixação, é importante que os cabos utilizados nessas instalações estejam preparados para suportar as mais adversas condições climáticas, pois estarão expostos a intensa radiação, calor, frio e chuva por um longo período. O dimensionamento mais detalhado dos componentes da instalação de acordo com a temperatura efetiva de trabalho e o método escolhido de proteção dos condutores utilizando-se o fator de correção de temperatura estão contidos na NBR 5410 (ABNT, 2008).

A respeito dos componentes de segurança que formam o chamado Balanço do Sistema (BOS) de sistemas fotovoltaicos, os dispositivos que o compõe são diodos de desvio e de bloqueio, fusíveis de proteção, varistores, disjuntores, sistemas de aterramento e de proteção contra descargas atmosféricas.

Sistema FV Conectado à Rede

A despeito dos sistemas isolados, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SCFRs) não precisam armazenar energia elétrica, pois trabalham como uma unidade de distribuição de eletricidade à rede concessionária local e devem operar obrigatoriamente em corrente alternada na mesma frequência e tensão, independentemente da irradiação solar no momento. Porém, o sistema a ser instalado deve estar de acordo com a legislação vigente. No Brasil, as normativas e procedimentos nacionais são definidos pela ANEEL, através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no

Sistema Elétrico Nacional (ANEEL, 2012), divididos em 11 módulos – cada um com um número próprio de revisões. A Seção 3.7 do Módulo 3 do PRODIST, em sua sétima revisão, classifica sistemas com acesso à rede em SFCRs de micro e minigeração distribuída, conforme potência instalada e faixa de tensão (ANEEL, 2017).

A instalação do sistema deve seguir a norma específica da concessionária local de distribuição de energia elétrica, através de um processo de solicitação de acesso, uma vez que a distribuidora é encarregada da realização de todos os estudos para a integração do sistema de micro e minigeração distribuída à rede. Isto é feito sem cobrança ao acessante que, por sua vez, deve preencher um relatório com os dados necessários do projeto a ser implantado para conhecimento da concessionária (ANEEL, 2017).

As condicionantes impostas pela PRODIST aos projetos de sistemas conectados à rede classificam os tipos de sistemas (micro ou minigeração) conforme faixa de potência e correspondente nível de tensão de conexão (baixa tensão monofásica, bifásica, trifásica ou média tensão), bem como requisitos mínimos de equipamentos de proteção. Para se iniciar o dimensionamento da potência do sistema conectado à rede, é preciso entender o sistema de compensação de energia (*net metering*) regulamentado na região. Segundo a Resolução Normativa N° 482/2012 adotada pela ANEEL, em 2012, consiste do dispositivo contratual feito entre a rede concessionária local e o cliente com uma residência dotada de um sistema fotovoltaico que possibilita a instalação consumidora-geradora receber um crédito pela energia excedente, registrada pelo medidor bidirecional instalado pela concessionária, entregue à rede elétrica nos meses de superávit energético e compensado nos meses de déficit de consumo.

Com isso, para se dimensionar o arranjo gerador após as etapas de levantamento do ciclo de demanda de carga e da disponibilidade anual de irradiação solar incidente, a potência dos painéis FV conectado à rede pode ser calculada pela Eq. 34. Nesta modalidade, há liberdade de se projetar o sistema para uma fração da demanda de energia elétrica consumida que se pretende suprir com os módulos, conforme desejo e orçamento do cliente, além de se basear pela irradiação média e não por meses de menor incidência.

$$P_{FV,GT} = \frac{E_{GT}/TD}{HSP_{MA}} \quad (34)$$

Na qual $P_{FV,GT}$ é a potência de pico dos painéis fotovoltaicos em Watts-pico do SFCR, E_{GT} é o consumo diário médio anual da carga em Wh/dia, HSP_{MA} é a média diária anual das Horas de Sol Pleno incidente no plano do painel fotovoltaico e TD é a taxa adimensional de desempenho (*performance rate*), uma relação entre o desempenho real do sistema sobre o desempenho máximo teórico possível. Essa taxa é um parâmetro estatístico para avaliar a geração de energia elétrica de um dado SFV conforme condições de instalação e operação. Para SFCRs residenciais, bem ventilados e não sombreados, uma TD entre 70 e 80% pode ser obtida nas condições de radiação solar encontradas no Brasil (GTES, 2014).

Em outros termos, é uma contabilização posterior das perdas associadas ao sistema, apresentado alternativamente abaixo em Eq. 35.

$$E_{pn,GT} = E_{CA}/(\eta_{inv} \cdot \eta_{cabos}) \quad (35)$$

Na qual η_{inv} é a eficiência do inversor, em torno de 85%, e η_{cabos} é a eficiência dos cabos, por volta de 98% (GTES, 2014). Para encontrar o número de painéis necessários ao sistema conectado à rede com a informação de potência de pico, é preciso se ajustar à seleção do inversor, considerando a tensão e corrente operacionais de entrada em corrente contínua e de saída em corrente alternada. Um parâmetro importante para a escolha do inversor é o Fator de Dimensionamento do Inversor - FDI, número adimensional que representa a relação entre a potência nominal P_{Nca} em corrente alternada do inversor em W e a potência de pico $P_{FV,GT}$ do gerador fotovoltaico do SFCR.

$$FDI = \frac{P_{Nca}}{P_{FV,GT}} \quad (36)$$

O dimensionamento do sistema deve ser realizado de maneira que o inversor não trabalhe por muito tempo em potências demasiadamente abaixo da nominal nem seja sobrecarregado, uma vez que o inversor é o componente mais caro e sensível do sistema. Uma vez que a potência do módulo FV reduz com o aumento de temperatura, mesmo quando a irradiância está próxima de 1000W/m², a potência do gerador FV dificilmente se aproxima de sua potência nominal. Neste caso específico, recomenda-se uma potência do inversor igual ou mesmo superior à potência do gerador fotovoltaico.

A potência instalada do arranjo de painéis FV e do inversor deve ser ajustada de modo que o FDI do inversor tenha a melhor relação custo/benefício. A otimização do FDI exige simulação numérica, que deve ser realizada utilizando-se dados horários de radiação e temperatura ambiente (GTES, 2014). A literatura mostra que os valores inferiores de FDI recomendados por fabricantes e instaladores situam-se na faixa de 0,75 a 0,85, enquanto que o limite superior é de 1,05.

Para encontrar o número de módulos fotovoltaicos em série, é necessário relacioná-lo à tensão de entrada do inversor, uma vez que deve suportar a soma das tensões dos módulos. Como a tensão possui forte dependência da temperatura, as condições extremas de inverno e verão deverão ser utilizadas no dimensionamento, garantindo a compatibilidade entre as tensões mínimas e máximas do gerador FV com a faixa de tensão de operação do inversor.

Para inversores sem SPPM, o número máximo de módulos em série que pode ser conectado ao inversor é calculado pela Eq. 37, análogo ao dimensionamento em sistemas isolados, onde $V_{inv,máx}$ é a máxima tensão em corrente contínua admitida pela entrada do inversor e $V_{oc, Tmin}$ é a tensão em circuito aberto de um módulo FV na menor temperatura de operação prevista.

$$N^{\circ} \text{módulos}_{\text{série}} \cdot V_{\text{oc, Tmin}} < V_{\text{inv,máx}} \quad (37)$$

Analogamente ao dimensionamento em sistemas isolados, o número de módulos conectados em série deve resultar em tensões que atendam à faixa de tensão SPPM conforme Eqs. 17, 18 e 19; desta vez definida pelo inversor com $V_{\text{ISPPM min}}$ e $V_{\text{ISPPM máx}}$ representando a mínima e a máxima tensão em corrente contínua do seguidor de ponto de potência máxima do inversor, respectivamente. Deve-se avaliar se o SFCR possui número suficiente de módulos conectados em série, de modo que a tensão do painel FV seja superior à mínima tensão de SPPM do inversor.

O inversor de sistemas conectados à rede possui uma corrente contínua máxima de entrada para garantir que este valor não seja ultrapassado, influenciando no número máximo de fileiras dos módulos fotovoltaicos conectados em paralelo através da Eq. 38, onde $I_{\text{inv, máx}}$ é a corrente contínua máxima admitida na entrada do inversor e I_{SC} é a corrente de curto-circuito do módulo FV nas condições de temperatura padrão.

$$N^{\circ} \text{Módulos}_{\text{paralelo}} = \frac{I_{\text{inv, máx}}}{I_{\text{SC}}} \quad (38)$$

Com a definição do número de módulos em série e em paralelo, o total de painéis a serem instalados no sistema é dado pela multiplicação destes – Eqs. 37 e 38. É válido comparar com a razão da área de irradiação pela área ocupada pelos módulos para confirmação do parâmetro no dimensionamento, analogamente ao descrito para SFI em Eq. 21. Por fim, o dimensionamento dos cabos e dos dispositivos de segurança são feitos de maneira análoga ao descrito para sistemas isolados pelas Eq. 30 a 33, porém o projeto deve-se atentar para a determinação do comprimento da fiação considerando os trechos entre as fileiras, as conexões entre o controlador, o inversor e o medidor bidirecional. Além disso, todos os dispositivos de proteção devem estar de acordo com

o regulamentado conforme a PRODIST, a NBR 5410 e as requisições da empresa concessionária de energia local (ABNT, 2008; GTES, 2014; ANEEL, 2017).

ANEXO C – COMPONENTES DA BANCADA

Ventilação dos dutos de ar de secagem e de regeneração da roda dessecante

Figura 45 - Soprador industrial Ventisilva E11 ALCD



Fonte: Ultrar

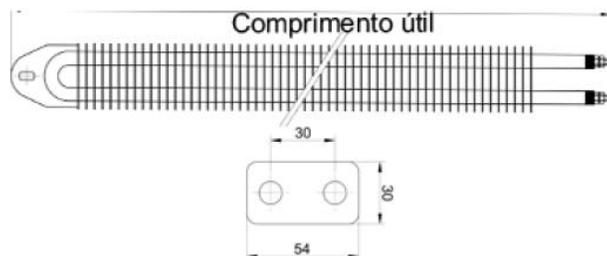
Tabela 12 - Especificação do microventilador Ultrar DF12038HBL2

Características técnicas do microventilador Ultrar DF12038HBL2	
Dimensões	120 x 120 x 39 mm
Material da carcaça	Alumínio
Tensão	127 / 230 V
Corrente	0,23 / 0,14 A
Potência	16,3 / 16 W
Rotação	2900 / 2600 RPM
Vazão mássica	0,052 kg/s
Pressão	75,95 Pa
Massa	550 g

Fonte: Ultrar.

Resistência de aquecimento do ar

Figura 46 - Resistência aletada Eltra



Fonte: Eltra.

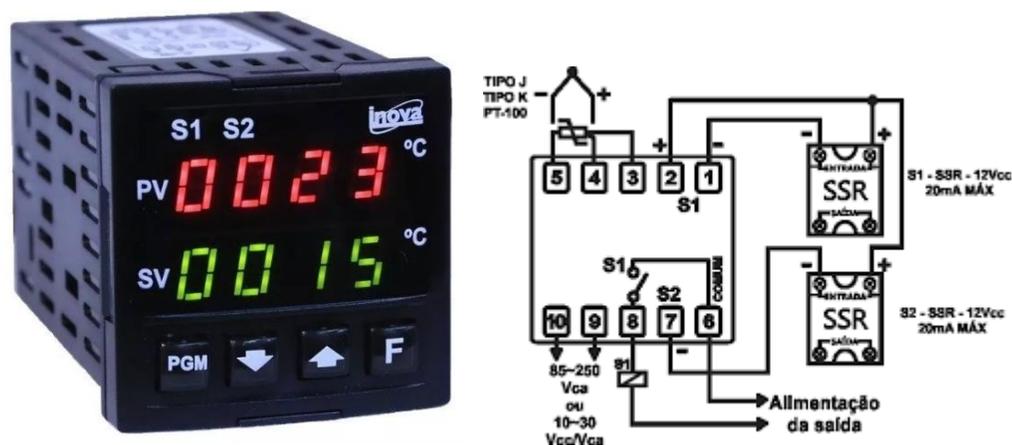
Tabela 13 - Especificação da resistência de aquecimento Eltra

Características técnicas da resistência aletada Eltra	
Dimensões da aleta	30 x 54 x 1 mm
Espaçamento entre aletas	10 mm
Diâmetro do tubo	11 mm
Comprimento total	340 mm
Tensão	220 V
Potência	1000 W
Material do tubo	Aço AISI 304
Potência por unidade de área	6 W/cm ²
Temperatura superficial máxima	400° C

Fonte: Eltra.

Controlador PID da temperatura do ar de regeneração de entrada

Figura 47 – Controlador PID de temperatura Inova INV-4003



Fonte: Inova.

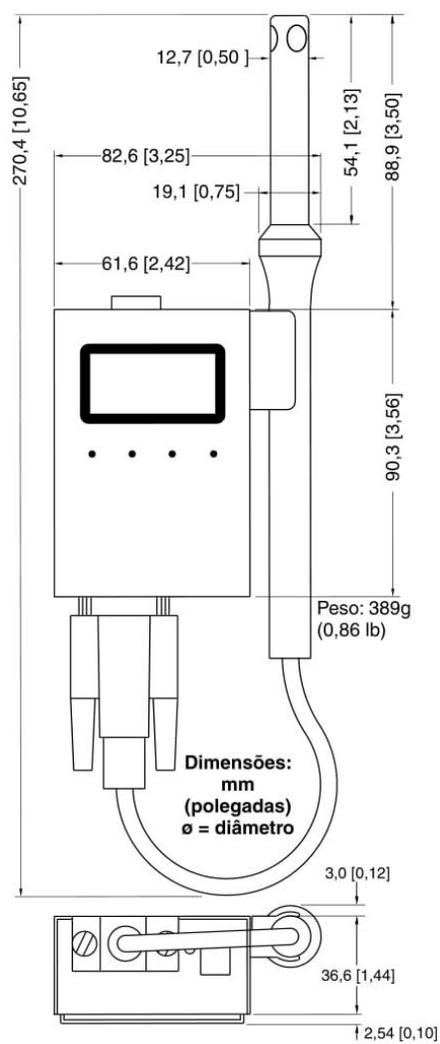
Tabela 14 - Especificação do controlador PID de temperatura Inova INV-4003/J

Características técnicas do controlador PID de temperatura Inova INV-4003/J	
Tipo de termopar e faixa de temperatura	J (-10 °C a 760 °C)
Faixa de alimentação	80 a 250 VCA (50/60 Hz)
Saída a relé	5 A / 250VCA
Erro máximo de medição relativo ao SPAN do sensor	0,25%
Dimensões	48 x 48 x 100 mm

Fonte: Inova.

Sensor de temperatura e umidade do ar

Figura 48 - Registrador gráfico de Temperatura e Umidade Relativa do Ar e Software de leitura iConnect



Fonte: Adaptado de OMEGA.

Tabela 15 - Especificação do registrador gráfico de temperatura e umidade OMEGA iTHX-SD

Características técnicas do registrador gráfico de temperatura e umidade OMEGA iTHX-SD	
Umidade relativa	
	10 a 90%: $\pm 2\%$
Exatidão/Intervalo	5 a 10% e 90% a 95%: $\pm 3\%$
	0 a 5% e 95% a 100%: $\pm 4\%$
Tempo de resposta	8 segundos
Resolução	0,1%
Histerese	$\pm 1\%$
Não-linearidade	$\pm 3\%$
Repetibilidade	$\pm 0,1\%$
Temperatura	
Faixa operacional de medição	0 °C a 70 °C
	5°C a 45°C: $\pm 0,5$ °C
Exatidão/Intervalo	0 a 5°C e 45°C a 70°C: ± 1 °C
Tempo de resposta	5 a 30 segundos
Resolução	0,1 °C
Repetibilidade	$\pm 0,1$ °C
Alimentação	
Tensão de Entrada	9 a 12 VCC
Tensão da Bateria	9 VCC

Fonte: OMEGA.

Sensor de temperatura e velocidade do ar

Figura 49 - Sensor de velocidade e temperatura do ar FMA-1001A-V1 com o respectivo Software de registro gráfico FMA-HFF 1000



Fonte: Adaptado de OMEGA.

Tabela 16 - Especificação do sensor de temperatura e velocidade do ar OMEGA FMA100A1-V1

Características técnicas do sensor de temperatura e velocidade do ar OMEGA FMA100A1-V1	
Velocidade	
Elemento de medição	1 RTD de 100 ohms, saída analógica de 0 a 5 VDC
Faixa de medição de velocidade	0 – 5,1 m/s
Resolução mínima de velocidade	0,01 m/s

Área de seção transversal da passagem de ar (medição de vazão)	129,03 cm ²
Precisão	± 1,5%
Temperatura	
Elemento de medição	2 RTD de 100 ohms, saída analógica de 0 a 5 VDC
Faixa de medição de temperatura	-40 a 121 °C
Resolução mínima de velocidade	0,1 °C
Precisão	± 1,5%
Tempo de resposta	0,25 a 2 s
Alimentação	15 – 24 VCC a 150 mA
Velocidade de transmissão (baud rate)	115200 bps
Dados	8 bits, sem paridade, 1 bit de parada

Fonte: OMEGA.

Registrador de temperatura OMEGA RDXL12SD e sonda termopar hipodérmica tipo T HYP0-33-1-T-G-60-SMP-M

Figura 50 – Registrador de temperatura OMEGA RDXL12SD (esquerda) e sonda termopar hipodérmica tipo T HYP0-33-1-T-G-60-SMP-M (direita)



Tabela 17 - Especificação registrador de temperatura OMEGA RDXL12SD e sonda termopar hipodérmica tipo T HYP0-33-1-T-G-60-SMP-M

Características técnicas da sonda termopar hipodérmica tipo T HYP0-33-1-T-G-60-SMP-M	
Resolução / Faixa / Precisão	0,1 °C / -100 a -50°C / $\pm(0,4\% + 1\text{ °C})$ 0,1°C / -50 a 400 °C / $\pm(0,4\% + 0,5\text{ °C})$
Diâmetro da agulha	0,2 mm
Comprimento da agulha	25 mm
Comprimento do fio	1,5 m
Características técnicas do registrador de temperatura OMEGA RDXL12SD	
Tipo do termopar	T (Cobre-Constantan)
Canais	12

Fonte: OMEGA.

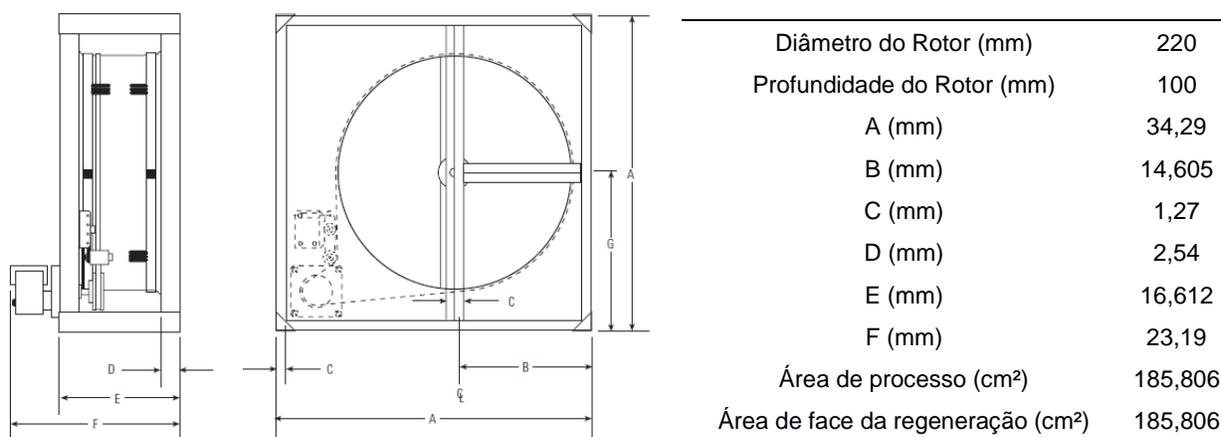
Roda Dessecante

Tabela 18 - Especificação da roda dessecante RotorSource C-220-100

Características técnicas da roda dessecante RotorSource C-220-100	
Diâmetro do rotor	220 mm
Profundidade do rotor	100 mm
Vazão mássica nominal	0,0438 kg/s
Dimensões da carcaça	342,9 x 342,9 x 231,9 mm
Massa	16,33 kg
Potência do motor	1,86 W

Fonte: RotorSource (2017).

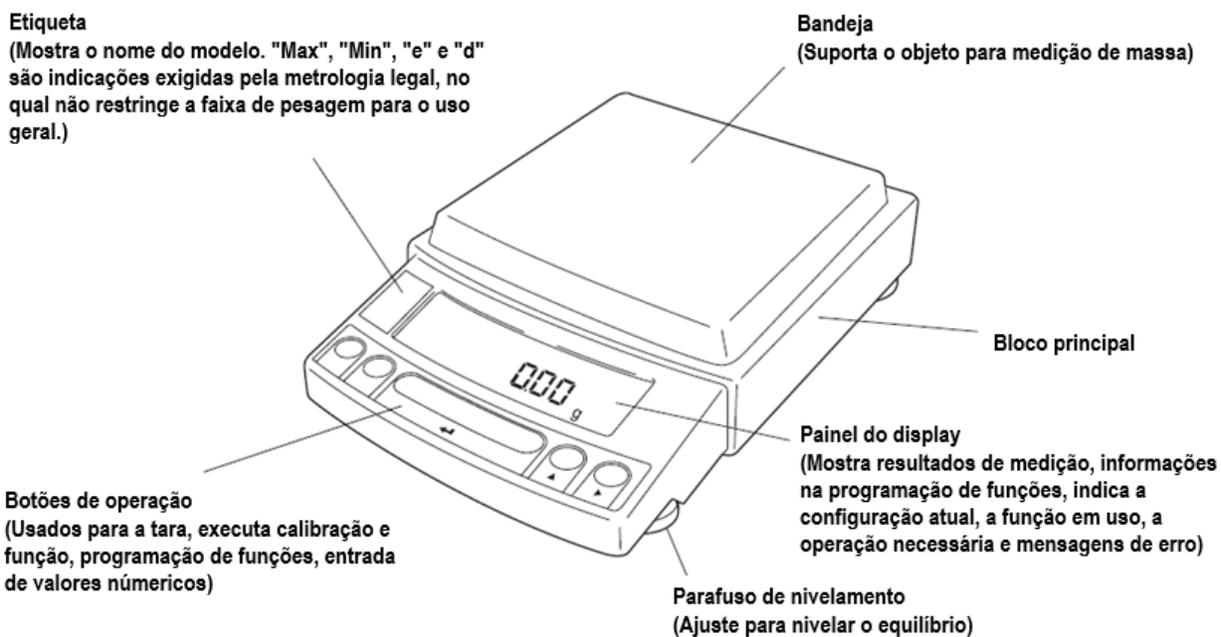
Figura 51 - Dimensões da roda dessecante



Fonte: Adaptado de RotorSource (2011).

Balança semianalítica

Figura 52 - Balança semianalítica Shimadzu UX6200H



Fonte: Adaptado de Shimadzu (2010).

Tabela 19 - Especificação da balança semianalítica Shimadzu UX6200H

Características técnicas da balança semianalítica Shimadzu UX6200H	
Capacidade de massa	6200 g
Medição mínima de massa	0,01 g
Faixa de calibração de massa	1000 – 6200 g
Repetibilidade	Menor que 0,01 g
Linearidade	± 0,02 g
Tempo de resposta	1,5 – 2,5 s
Dimensões da bandeja	180 x 170 mm
Dimensões da balança	317 x 190 x 78 mm
Massa da balança	2,9 kg

Fonte: Shimadzu.

Tabela 20 - Especificação do sensor não-invasivo de corrente YHDC SCT-013

Características técnicas do sensor não-invasivo de corrente YHDC SCT-013	
Material do núcleo	Ferrita
Tamanho aberto	13 mm x 13 mm (1 m de fio de cobre)
Faixa de corrente de entrada	0 – 100 A
Faixa de tensão de saída	0 – 50 mV
Não-linearidade	± 3% (10% - 120% da corrente nominal de entrada)
Razão de espira	100 A / 0,05 A
Temperatura de trabalho	-25°C a 170 °C
Resistência dielétrica	1000 V _{CA} /min
Massa da balança	2,9 kg

Fonte: Shimadzu.

ANEXO D – COMPONENTES DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADO E CONECTADO À REDE

Tabela 21 - Especificação dos painéis fotovoltaicos escolhidos no dimensionamento

Características técnicas dos painéis fotovoltaicos utilizados					
Modelo	Yingli Solar YL280P-29b	Yingli Solar YL320P-35b	Canadian Solar CS6P- 260P	Canadian Solar CS3W-395P	Risen RSM36-6- 150P
Potência de pico (Wp)	280	320	260	395	150
Corrente de curto-circuito (A)	9,45	9,18	8,43	10,9	8,81
Tensão de circuito aberto (V)	38,2	46	37,4	47	22,3
Tensão PMPP (V)	31,4	37	30,2	38,5	18,3
Coefficiente de tensão (mV/°C)	-0,32	-0,32	-0,34	-0,29	-0,39
Área do painel (m ²)	1,637	1,94	1,608	2,209	1,006
Rendimento (%)	17,10	16,50	16,16	17,88	15,15

Fonte: Neosolar.

Tabela 22 - Especificação dos inversores off-grid utilizados

Características técnicas dos inversores off-grid utilizados					
Modelo	Victron Aldo 800VA	EPEVER IP2000-22	MS4024PAE	MS4448PAE	Schneider XW4548 230-50
Potência Nominal (W)	800	2000	2600	2860	4500
Tensão máxima de entrada (Vcc)	34	40	34	64	64
Corrente máxima de entrada (Acc)	86	148	18	36	96
Tensão de saída (Vca)	220	220	120 a 240	120 a 240	80 a 270
Rendimento (%)	85	95	85	85	90 a 95%

Fonte: Neosolar.

Tabela 23 - Especificação dos controladores de carga off-grid utilizados

Características técnicas dos controladores de carga off-grid utilizados		
Modelo	Xantrex C40	Victron MPPT 35A
Configuração de tensão (Vcc)	12/24/48	12/24/48
Tensão máxima de circuito aberto do painel FV (Vcc)	125	150
Corrente máxima (Acc)	40	35

Fonte: Neosolar.

Tabela 24 - Especificação da bateria utilizada

Característica técnica da bateria utilizada	
Modelo	Moura 12MF220
Regime de Trabalho (Horas)	20
Profundidade de Descarga a 1500	40%
Tensão Nominal (V)	12
Capacidade (A.h)	220

Fonte: Neosolar.

Tabela 25 - Especificação dos inversores grid-tie utilizados

Características técnicas dos inversores grid-tie utilizados					
Modelo	APsystems YC500A	Sunny Boy 1300TL	Growatt 1500-S	Fronius Galvo 2.0-1	ECOS3000
Potência Nominal (W)	500	1300	1500	2000	3000
Tensão máxima de entrada (Vcc)	55	600	450	420	480
Corrente máxima de entrada (Acc)	12	12	10	17,8	10
Tensão de saída (Vca)	127 a 220	180 a 260	180 a 240	180 a 270	122 a 265
Rendimento (%)	95,5	96	97	96	98

Fonte: Neosolar.

ANEXO E – ALGORITMO EM LINGUAGEM VB DE AQUISIÇÃO DE DADOS POR COMUNICAÇÃO ETHERNET VIA PLANILHA DO REGISTRADOR GRÁFICO DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA

```
Private Sub RHTemp1_OnReadingsUpdate(sngTemperature As Single, lngTemperatureError As Long,
sngHumidity As Single, lngHumidityError As Long, sngDewpoint As Single, lngDewpointError As Long,
lngReadingsUpdateError As Long)
```

```
    On Error Resume Next
```

```
    With Sheet1
```

```
        If .Range("C2") < 6 Then .Range("C2") = 6
```

```
        '.Range("A" & .Range("C2")) = Date & " " & Time
```

```
        !*****
```

```
        Select Case lngReadingsUpdateError
```

```
            Case 0
```

```
                .Range("B" & .Range("C2")) = FC(sngTemperature)
```

```
                .Range("C" & .Range("C2")) = sngHumidity
```

```
                .Range("D" & .Range("C2")) = FC(sngDewpoint)
```

```
                .Range("G" & .Range("C2")) = 0
```

```
            Case Else
```

```
                If lngTemperatureError = 0 Then
```

```
                    .Range("B" & .Range("C2")) = FC(sngTemperature)
```

```
                Else
```

```
                    .Range("B" & .Range("C2")) = ""
```

```
                End If
```

```
                If lngHumidityError = 0 Then
```

```
                    .Range("C" & .Range("C2")) = sngHumidity
```

```
                Else
```

```
                    .Range("C" & .Range("C2")) = ""
```

```
            End If
```

```
                If lngDewpointError = 0 Then
```

```
                    .Range("D" & .Range("C2")) = FC(sngDewpoint)
```

```
                Else
```

```
                    .Range("D" & .Range("C2")) = ""
```

```
            End If
```

```

        .Range("G" & .Range("C2")) = lngReadingsUpdateError
    End Select
    *****

    .Range("C2") = .Range("C2") + 1
    End With
End Sub

Private Sub RHTemp1_OnTimer()
    On Error Resume Next
    Dim rval As Long
    Dim rval2 As Long
    Dim sngTemperature As Single, sngHumidity As Single, sngDewpoint As Single
    Dim lngTemperatureError As Long, lngHumidityError As Long, lngDewpointError As Long
    Dim sngTemperature2 As Single, sngHumidity2 As Single, sngDewpoint2 As Single
    Dim lngTemperatureError2 As Long, lngHumidityError2 As Long, lngDewpointError2 As Long
    Dim tTime
    Dim dDate
    Dim strTime As String

    tTime = Time
    dDate = Date
    strTime = Format(tTime, "hh:mm:ss")
    Sheet1.Cells(3, 4) = strTime

    With Sheet1
        If .Range("C2") < 6 Then .Range("C2") = 6
        .Range("A" & .Range("C2")) = strTime ' dDate & " " & Time

        RHTemp1.NumberOfReadOrWriteAttempts = -6 ' Backdoor to force Ch1 degrees C readings
        rval = RHTemp1.GetReadings(sngTemperature, lngTemperatureError, sngHumidity,
        lngHumidityError, sngDewpoint, lngDewpointError)
        RHTemp1.NumberOfReadOrWriteAttempts = -7 ' Backdoor to force Ch1 degrees C readings
        rval2 = RHTemp1.GetReadings(sngTemperature2, lngTemperatureError2, sngHumidity2,
        lngHumidityError2, sngDewpoint2, lngDewpointError2)
        RHTemp1.NumberOfReadOrWriteAttempts = -6 ' Backdoor to force Ch1 degrees C readings
        If rval = 0 And rval2 = 0 Then

```

```

.Range("B" & .Range("C2")) = FC(sngTemperature)
.Range("C" & .Range("C2")) = sngHumidity
.Range("D" & .Range("C2")) = FC(sngDewpoint)
.Range("E" & .Range("C2")) = FC(sngTemperature2)
.Range("F" & .Range("C2")) = sngHumidity2
.Range("G" & .Range("C2")) = FC(sngDewpoint2)
.Range("H" & .Range("C2")) = 0
Elseif rval < 0 Or rval2 < 0 Then
  If IngTemperatureError = 0 Then
    .Range("B" & .Range("C2")) = FC(sngTemperature)
  Else
    .Range("B" & .Range("C2")) = ""
  End If
  If IngHumidityError = 0 Then
    .Range("C" & .Range("C2")) = sngHumidity
  Else
    .Range("C" & .Range("C2")) = ""
  End If
  If IngDewpointError = 0 Then
    .Range("D" & .Range("C2")) = FC(sngDewpoint)
  Else
    .Range("D" & .Range("C2")) = ""
  End If
  If IngTemperatureError2 = 0 Then
    .Range("E" & .Range("C2")) = FC(sngTemperature2)
  Else
    .Range("E" & .Range("C2")) = ""
  End If
  If IngHumidityError2 = 0 Then
    .Range("F" & .Range("C2")) = sngHumidity2
  Else
    .Range("F" & .Range("C2")) = ""
  End If
  If IngDewpointError2 = 0 Then
    .Range("G" & .Range("C2")) = FC(sngDewpoint2)
  End If

```

```
Else
    .Range("G" & .Range("C2")) = ""
End If

.Range("H" & .Range("C2")) = rval
End If
Call Module1.Send
'.Range("C2") = .Range("C2") + 1
End With
End Sub
```