



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Glawther Lima Maia

**MELHORIA ENERGÉTICA DE SECADORES POR CICLO DE AQUECIMENTO-
PULSO DE VÁCUO DE PEQUENA ESCALA PARA PROCESSAMENTO
AGROINDUSTRIAL: INTEGRAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS E AVALIAÇÃO
ECONÔMICA**

Florianópolis

2024

Glawther Lima Maia

**MELHORIA ENERGÉTICA DE SECADORES POR CICLO DE AQUECIMENTO-
PULSO DE VÁCUO DE PEQUENA ESCALA PARA PROCESSAMENTO
AGROINDUSTRIAL: INTEGRAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS E AVALIAÇÃO
ECONÔMICA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. João Borges Laurindo, Dr.

Coorientador: Prof. Edilson Mineiro Sá Junior, Dr.

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Maia, Glawther Lima

Melhoria energética de secadores por ciclo de aquecimento-pulso de vácuo de pequena escala de pequena escala para processamento agroindustrial : integração de fontes renováveis e avaliação econômica / Glawther Lima Maia ; orientador, João Borges Laurindo, coorientador, Edilson Mineiro Sá Junior, 2023.

131 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Alimentos. 2. Engenharia de Alimentos. 3. Secagem. 4. Eficiência energética. 5. Avaliação tecnológicas e econômica. I. Laurindo, João Borges. II. Junior, Edilson Mineiro Sá. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. IV. Título.

Glawther Lima Maia

**MELHORIA ENERGÉTICA DE SECADORES POR CICLO DE AQUECIMENTO-
PULSO DE VÁCUO DE PEQUENA ESCALA PARA PROCESSAMENTO
AGROINDUSTRIAL: INTEGRAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS E AVALIAÇÃO
ECONÔMICA**

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. João Borges Laurindo, Dr. – Presidente
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Paolo Germanno Lima de Araújo, Dr. – Membro externo
Instituto Federal de Educação Ciências e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Ricardo Lemos Monteiro, Dr. – Membro interno
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Alan Ambrosi Dr. – Membro interno
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Alimentos.

Profa. Jaciane Lutz Ienczak, Dr.(a)

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos

Prof. João Borges Laurindo, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2024

Dedico à minha amada família,
por todo amor, paciência e incentivo
ao longo de toda esta caminhada.

AGRADECIMENTOS

A construção do saber é um esforço conjunto, ainda que as contribuições individuais possam parecer modestas. Sinto uma imensa gratidão pela assistência proporcionada por várias pessoas ao longo dessa jornada. Este registro serve como uma declaração da significativa e profunda dimensão humana necessária para concretizar uma empreitada científica.

Expresso minha gratidão a Deus pelo presente da vida, pela saúde e pelo conhecimento que Ele me concedeu, bem como pelas pessoas e circunstâncias que colocou em meu caminho, contribuindo de maneira significativa para a realização desta tese.

À toda minha família, em especial à minha amada esposa Katiúscia Furtado. Cada conquista alcançada neste trabalho é fruto do amor, encorajamento e inspiração que ela sempre ofereceu de maneira tão genuína. Sua presença em nossas vidas é uma bênção constante, e sua dedicação, incentivo, paciência e proteção são verdadeiramente admiráveis. Agradeço imensamente por ser a pessoa maravilhosa que é, por tornar nossos dias em poesia e ser a base sólida do nosso lar. Meu amor por você é intenso e eterno.

Mariana e Miguel Maia, vocês são meu maior tesouro, e a cada dia reforçam o significado mais profundo da palavra "amor". Desde o momento em que Deus nos abençoou, meu coração se encheu de alegria, orgulho e gratidão. Amo vocês!

À orientação do Prof. Dr. João Borges Laurindo e coorientação do Prof. Dr. Edilson Mineiro Sá Junior, agradeço pela disposição em caminhar ao meu lado durante o doutorado, pelo compromisso, valiosos ensinamentos, compreensão e apoio nesta etapa crucial da minha jornada acadêmica.

Aos membros da banca examinadora, agradeço por aceitarem o convite e por suas valiosas contribuições a este trabalho.

Agradeço ao Instituto Federal de Ciências e Tecnologia do Ceará (IFCE) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), à qual devo todas as etapas do doutorado, liberação, formação, laboratórios, apoio e o conhecimento construído.

Aos demais docentes do PPGEAL e ao secretário Fernando Curbani da UFSC, expresso minha gratidão por orientarem a construção do meu conhecimento durante as disciplinas e atividades extracurriculares. A todos os integrantes e

colaboradores do Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos (PROFI), agradeço a disponibilidade de espaço e tempo que possibilitaram a realização deste projeto. Um agradecimento especial ao Dr. Ricardo Lemos Monteiro, Dra. Jaqueline Oliveira de Moraes e Thayla Roratto.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado e as Coordenações do Doutorado em Engenharia de Alimentos, modalidade Interinstitucional (DINTER) para docentes do Instituto Federal do Ceará (IFCE), professora Dra. Marlene Nunes Damaceno (IFCE) e o professor Dr. Marco Di Luccio (UFSC).

Aos colegas do DINTER, João Osvaldo Silva Campos, Renata Barros Silveira Brasil, Patrícia Campos Mesquita, Otilia Mônica Alves Borges, Marcela Coelho de Souza, Leiliane Teles César, Katiane Arrais Jales, Érika Taciana Santana Ribeiro e Elayne Carvalho de Vasconcelos que sempre estiveram apoiando o andar do doutorado e em todas as atividades que compartilhamos.

Aos amigos Francilino Carneiro de Araújo, Rafael Vitor e Silva, Fabiano Carneiro Ribeiro e colegas do IFCE, quero expressar minha gratidão pela parceria constante e pelo suporte diário. Agradeço por todas as valiosas contribuições técnicas, compartilhamento de conhecimentos, amizade, apoio e empatia nos momentos mais desafiadores.

Quero expressar minha sincera gratidão aos amigos e familiares que sempre ofereceram compreensão, apoio e incentivo para o sucesso deste projeto. Agradeço a todos que torceram, rezaram e contribuíram para que este projeto se tornasse realidade. Muito obrigado!

Procurei o Senhor e ele me atendeu,
livrou-me de todos os temores.
(Salmo 33,5)

RESUMO

A agregação de valor e qualidade dos produtos desidratados beneficia os pequenos produtores, reduzindo perdas e aumentando a renda através da produção de frutas desidratadas crocantes, seguras, saudáveis e saborosas. No entanto, o processo de secagem é uma das etapas que mais consome energia. Além do impacto nos custos energéticos, a legislação ambiental referente à poluição e a crescente demanda por tecnologias sustentáveis impulsionam a busca por processos de secagem energeticamente eficientes. O objetivo desta tese é analisar detalhadamente as dimensões tecnológicas e econômicas, visando aprimorar a eficiência energética de um secador de aquecimento-pulso de vácuo de pequena escala voltado para pequenos produtores, incorporando fontes de energia renovável. O procedimento incluiu uma auditoria energética detalhada e propostas de intervenções em pontos críticos para redução do consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa. As análises energéticas alcançaram 53,6% de eficiência no equipamento de secagem já validado, com consumo diário de 134,8 kWh, totalizando 49.067 kWh anuais e custo médio de produção de US\$ 18,29 por quilo de banana desidratada por ciclo de aquecimento-pulso de vácuo com auxílio de coletores solares. Resultados indicam alta viabilidade econômica, com período de recuperação do capital em menos de 17 meses e indicadores de benefício-custo favoráveis. O controle de temperatura usando água quente oferece precisão, mas pode ser desvantajoso para pequenos produtores devido a desafios como tempo de aquecimento e trocas térmicas noturnas. A análise ambiental mostrou uma emissão entre 2,48 e 3,99 toneladas de CO₂ equivalente anuais. Um novo sistema de aquecimento foi desenvolvido, alcançando eficiência de 52,5%, porém reduzindo os custos de produção para \$11,02 por quilo de banana desidratada. O novo sistema envolveu a utilização de resistências elétricas posicionadas diretamente sob a bandeja de secagem, com o suporte da energia fotovoltaica. O sistema fotovoltaico de 8,5 kWp, com investimento de \$12.222,00 e período de recuperação de 4,3 anos, tornou-se viável. A vantagem do aquecimento elétrico direto é o menor custo de construção e o aquecimento rápido do sistema. A estratégia de incorporar a geração distribuída de energia solar fotovoltaica ao processo de secagem é valiosa, proporcionando retorno do capital em menos de 15 meses e redução significativa nas emissões de carbono, que oscilaram entre 0,7 e 1,13 toneladas de CO₂ equivalente. Energias renováveis em secadores de pequena escala são economicamente e tecnologicamente viáveis, promovendo uma produção mais sustentável.

Palavras-chave: secagem; eficiência energética; avaliação tecnológicas e econômica; fontes de energia.

ABSTRACT

The addition of value and quality to dehydrated products benefits small-scale producers by reducing losses and increasing income through the production of crispy, safe, healthy, and tasty dehydrated fruits. However, the drying process is one of the stages that consumes the most energy. In addition to the impact on energy costs, environmental legislation related to pollution and the growing demand for sustainable technologies drive the search for energetically efficient drying processes. The objective of this thesis is to analyze in detail the technological and economic dimensions, aiming to enhance the energy efficiency of a small-scale vacuum pulse heating dryer focused on small producers by incorporating renewable energy sources. The procedure involved a detailed energy audit and proposals for interventions at critical points to reduce energy consumption and greenhouse gas emissions. The energy analyses achieved 53.6% efficiency in the previously validated drying equipment, with a daily consumption of 134.8 kWh, totaling 49,067 kWh annually, and an average production cost of \$18.29 per kilogram of dehydrated banana using a vacuum-pulse heating cycle with the assistance of solar collectors. The results indicate high economic viability, with a capital payback period of less than 17 months and favorable cost-benefit indicators. Temperature control using hot water offers precision but may be disadvantageous for small producers due to challenges such as heating time and nocturnal thermal exchanges. The environmental analysis showed emissions ranging from 2.48 to 3.99 tons of CO₂ equivalent annually. A new heating system was developed, achieving 52.5% efficiency and reducing production costs to \$11.02 per kilogram of dehydrated banana. The new system involved the use of electric resistances positioned directly under the drying tray, supported by photovoltaic energy. The 8.5 kWp photovoltaic system, with an investment of approximately \$12,222.00 and a payback period of 4.3 years, became feasible. The advantage of direct electric heating is the lower construction cost and rapid heating of the system. The strategy of incorporating distributed solar photovoltaic energy generation into the drying process is valuable, providing a capital return in less than 15 months and a significant reduction in carbon emissions, ranging from 0.7 to 1.13 tons of CO₂ equivalent. Renewable energies in small-scale dryers are economically and technologically feasible, promoting a more sustainable production.

Keywords: drying; energy efficiency; technological and economic assessment; energy sources.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de um liofilizador que opera em batelada	29
Figura 2 – Representação esquemática do mecanismo de expansão	30
Figura 3 - Evolução de pressão e temperatura vs. tempo durante o processo de secagem por ciclos sucessivos de aquecimento-pulso de vácuo.....	32
Figura 4 - Micrografias com aumento de imagem de 20x: (a) fratura de manga comercial liofilizada; (b) fratura de manga seca por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV).....	34
Figura 5 - Capacidade de reidratação das amostras de banana <i>in natura</i> secas por CAPV e amostras de banana comercial liofilizada	35
Figura 6 - Fotografia das bananas secas por liofilização no laboratório (1), comercial liofilizada (2), por MV – 400 W (3), 700 W (5), 1000 W (7) e por MVMFD - 400 W (4), 700 W (6) e 1000 W (8).....	37
Figura 7 - Imagens do estereoscópio óptico das bananas desidratadas por diferentes métodos de secagem (a) Secagem Convectiva, (b) Secagem a vácuo, (c) Liofilização e (d) CAPV todas com ampliação de 15 vezes.	38
Figura 8 - Níveis de irradiação solar médio por região brasileira.	46
Figura 9 - Curva de eficiência com a temperatura ambiente (T_a) fixada em 25°C, a irradiância (G) mantida em 800 W/m ² em relação à temperatura de entrada do fluido de trabalho no coletor (T_e , em °C).	48
Figura 10 - Diagrama de blocos do secador híbrido.....	60
Figura 11 – Diagrama do dispositivo experimental do sistema de secagem	61
Figura 12 - Principais componentes do secador híbrido desenvolvido: (1) bomba de vácuo; (2) condensador; (3) banho termostático; (4) filtro coalescente; (5) mesa de secagem; (6) reservatório térmico de água; e (7) bombas de circulação de água....	62
Figura 13 - Fluxo de energia em um reservatório de água quente.....	66
Figura 14 - Fluxograma de processamento das frutas no secador híbrido.	76
Figura 15 – Balanço de massa na etapa de secagem	78
Figura 16 - Balanço de energia na etapa de secagem.....	82
Figura 17 – Média da radiação global e temperatura do sistema de aquecimento versus horas do dia.	86
Figura 18 - Equipamento experimental empregado para a secagem de frutos com aquecimento elétrico	95

Figura 19 – Características do módulo fotovoltaico instalado.	101
Figura 20 – Equipamentos para geração da energia fotovoltaica utilizados para validação do estudo energético.....	101
Figura 21 – Analogia do modelo elétrico da transferência de calor e suas resistências.	102
Figura 22 – Teste experimental para confirmação da distribuição homogênea de calor por meio de imagem termográfica.	109
Figura 23 – Comportamento da temperatura (—) e do consumo elétrico (- - -)	110
Figura 24 – Nível de irradiação solar diária média incidente em Sobral.....	112

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Algumas características encontradas na secagem	26
Quadro 2 – Resumo da eficiência energética de diferentes secadores a vácuo (VD), micro-ondas (MW) e liofilização (FD).	55
Quadro 3 - Os principais parâmetros considerados neste estudo.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da banana prata por 100 gramas de parte comestível: centesimal, minerais e vitaminas.....	40
Tabela 2 - Síntese das estimativas de consumo energético do sistema de secagem mediante a incorporação de coletores solares para fins de aquecimento.....	82
Tabela 3 - Informações referentes aos equipamentos elétricos empregados	84
Tabela 4 - Resumo das estimativas de custos anuais do processo	87
Tabela 5 – Dados da estimativa de receita bruta e custo.....	88
Tabela 6 – Estimativa de receita bruta e lucro bruto	88
Tabela 7 - Custo associados ao equipamento	89
Tabela 8 - Fluxo de caixa descontado.....	89
Tabela 9 - Valores VPL, TIR e <i>Payback</i>	90
Tabela 10 – Estimativa de geração de carbono equivalente	90
Tabela 11 - Dados técnicos do inversor solar instalado	100
Tabela 11 – Síntese do consumo energético da câmara de secagem mediante a incorporação do acionamento direto na placa de alumínio por resistência elétrica.	107
Tabela 12 - Informações referentes aos equipamentos elétricos empregados	111
Tabela 13 - Consumo médio de energia elétrica em uma batelada	111
Tabela 14 - Características do módulo solar instalado.....	113
Tabela 16 - Resumo das estimativas de custos anuais do processo	114
Tabela 17 – Dados da estimativa de receita e custo.....	114
Tabela 18 – Estimativa de receita bruta e lucro bruto	115
Tabela 19 - Custo associados ao equipamento experimental	115
Tabela 20 - Fluxo de caixa descontado.....	116
Tabela 21 - Valores VPL, TIR e <i>Payback</i>	116
Tabela 22 – Estimativa de geração de carbono equivalente	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	área [m ²]
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
Ac	área absorvedora do coletor solar [m ²]
AOAC	Associação Oficial de Química Analítica
a-Si	silício amorfo
a _w	atividade de água
Ca	cálcio
CA	energia elétrica em corrente alternada
cal	caloria
CAPV	ciclos de aquecimento-pulso de vácuo
CC	energia elétrica em corrente contínua
CCP	coletores cilindro-parabólicos
CD	secagem convectiva em forno
CdTe	telureto de cádmio
CIGS	disseleneto de cobre, índio e gálio
CMFD	secagem convectiva com ciclo de aquecimento-pulso de vácuo
CO ₂	dióxido de carbono
COP26	26 ^a Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática
C _p	calor específico da água a pressão constante [kJ/kg °C]
CPC	coletores planos comuns
CPV	coletores planos com vácuo
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
c-Si	silício cristalino
CTV	coletores tubos de vácuo
DIC	descompressão súbita controlada (<i>instant controlled pressure drop</i>)
DPS	dispositivo de proteção contra surtos
E _A	energia fornecida pelo aquecedor auxiliar [kJ]
EAF	energia da água fria que reabastece o reservatório [kJ]
E _{aq,fruta}	energia necessária para aquecer a fruta
E _{AQC}	energia da água quente para consumo [kJ]
E _{AQR}	energia da água quente contida no reservatório [kJ]
E _c	energia consumida
E _{CS}	energia solar captada pelo coletor solar e fornecida ao reservatório [kJ]
E _{entrada}	energia de entrada
E _{fornecida}	energia fornecida
E _{PA}	energia perdida para o ambiente [kJ]
E _{perda}	energia perdida
E _{PR}	energia perdida pela água na recirculação [kJ]
E _{saída}	energia de saída
ESG	Meio ambiente, questões sociais e governança
E _{útil}	energia útil
FD	liofilização
FDI	fator de dimensionamento do inversor
Fe	ferro
FV	fotovoltaico
g	grama
G	irradiância
GEE	gases de efeito estufa
h	hora
HSP	Horas de Sol Pleno
HSPMA	média diária anual das HSP incidente no plano do módulo FV [h];
IBC	indicadores de Benefício-Custo

IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
IPCC	Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas
J	Joule
K	potássio
KMFD	secagem condutiva com ciclo de aquecimento-pulso de vácuo
KMFD-VD	secagem condutiva com ciclo de aquecimento-pulso de vácuo combinada com secagem a vácuo
k_x	condutividade térmica do material "x" [W/m°C];
L _x	espessura do material "x" [m];
m	metro
m_{AF}	massa de água fria que entra no reservatório no intervalo Δt (kg)
MEV	microscopia eletrônica de varredura
m_p	massa inicial do produto (kg);
MPP	ponto de máxima potência
m_s	massa da amostra em sua base seca
m-Si	silício monocristalino
m_w	massa de água removida
MW	micro-ondas
m_x	massa do elemento "x"
NBR	Norma Brasileira
ODS	objetivos de desenvolvimento sustentável
P_e	potência da resistência elétrica [W]
P_{FV}	potência pico do módulo fotovoltaico [Wp]
PNca	potência nominal em corrente alternada do inversor [W]
PROFI	Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos
p-Si	silício policristalino
PTFE	politetrafluoroetileno
Q	quantidade de calor recebida ou cedida pelo corpo [kJ].
q'	transferência de calor por unidade de tempo [J/s].
RSI	radiação solar incidente [W/m ²]
R_x	resistência térmica do material "x"
SAS	sistemas de aquecimento solar
SER	consumo médio específico de energia
SMER	taxa de extração de umidade específica
t	tempo, em segundos [s];
T _a	temperatura ambiente
T _{AF}	temperatura da água fria que abastece os reservatórios [°C]
T _{AQC}	temperatura da água quente que sai do reservatório [°C]
T _{ar}	temperatura média do ar entre os dois instantes [°C]
TD	taxa de desempenho
TD	taxa de desempenho
T _f	temperatura da fonte fria [°C];
TIR	taxa interna de retorno
T _M	temperatura média de secagem
T _q	temperatura da fonte quente [°C]
T _{Re}	temperatura média da água na entrada do reservatório [°C]
T _{Rs}	temperatura média da água na saída do reservatório [°C]
TSS	teor de sólidos solúveis
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
U _R	coeficiente global de transferência de calor do reservatório [W/°C]
VD	secagem a vácuo convencional
VPL	valor presente líquido
W	Watt
ΔE_R	variação da energia total no reservatório [kJ]

Δt	intervalo de tempo
η	eficiência
ΔH_v	entalpia específica de vaporização na pressão final de trabalho [J/kg].
η_{Re}	rendimento da resistência elétrica (fonte auxiliar)
ΔT	diferença de temperatura [°C]
\dot{m}_{AQC}	massa de água quente que sai do reservatório no intervalo Δt [kg]
\dot{m}_C	vazão em massa que passa pelo coletor [kg/s]
\overline{TR}	temperatura média da água do reservatório [°C]
3E	Energia, meio ambiente e economia (<i>energy, environment and economy</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS.....	23
1.1.1.	Objetivo Geral	23
1.1.2.	Objetivos Específicos	23
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	SECAGEM.....	25
2.1.1.	Secagem por fritura	27
2.1.2.	Secagem por liofilização	28
2.1.3.	Secagem por <i>puff-drying</i>	29
2.1.4.	Secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo	30
2.2	SECAGEM POR CICLOS DE AQUECIMENTO-PULSO DE VÁCUO (CAPV): AVANÇOS TECNOLÓGICOS E O ESTADO DA ARTE.....	32
2.3	BANANA.....	40
2.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE ENERGIA NA SECAGEM.....	41
3	ESTUDO DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UM SECADOR CICLOS DE AQUECIMENTO-PULSO DE VÁCUO COM AQUECIMENTO DE ÁGUA A PARTIR DE COLETORES SOLARES	58
3.1	INTRODUÇÃO.....	58
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
3.2.1.	Preparação das amostras	59
3.2.2.	O secador de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo	60
3.2.3.	Análise energética	63
3.2.4.	Análise da viabilidade econômica do processo	72
3.2.5.	Quantificação da geração de carbono equivalente	75
3.2.6.	Metodologia de secagem	75
3.2.7.	Caracterização do produto desidratado	77
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	77
3.3.1.	Balanço de massa	77
3.3.2.	Balanço de energia	79
3.3.3.	Mensuração do consumo elétrico dos equipamentos de apoio	83

3.3.4.	Irradiação solar e a variação da temperatura do sistema de aquecimento	85
3.3.5.	Cálculo da eficiência energética	86
3.3.6.	Análise da viabilidade econômica do processo	86
3.3.7.	Quantificação da geração de carbono equivalente	90
3.4	CONCLUSÕES PARCIAIS	91
4	ESTUDO DA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM SECADOR DE ALIMENTOS PARA O PEQUENO PRODUTOR ATRAVÉS DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO ELÉTRICO COM SUPORTE DA ENERGIA FOTOVOLTAICA	93
4.1	INTRODUÇÃO	93
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS	94
4.2.1.	Preparação das amostras	94
4.2.2.	Dispositivo experimental construído e empregado para desidratação com aquecimento elétrico	95
4.2.3.	Pressupostos	96
4.2.4.	Taxa de transferência de calor por condução	96
4.2.5.	Dimensionamento do sistema fotovoltaico.....	97
4.2.4.1	<i>Levantamento adequado de demanda e consumo de energia elétrica</i>	<i>98</i>
4.2.4.2	<i>Dimensionamento do gerador fotovoltaico</i>	<i>98</i>
4.2.4.3	<i>Dimensionamento dos inversores</i>	<i>99</i>
4.2.4.4	<i>Módulos fotovoltaicos.....</i>	<i>100</i>
4.2.6.	Dimensionamento do sistema de aquecimento.....	102
4.2.7.	Balanço de massa	105
4.2.8.	Medições do consumo de energia elétrica e acompanhamento da distribuição do calor	105
4.2.9.	Análise de viabilidade econômica	106
4.2.10.	Quantificação da geração de carbono equivalente	106
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	106
4.3.1.	Dimensionamento do sistema de aquecimento do secador.....	106
4.3.2.	Balanço de massa	107
4.3.3.	Balanço de energia.....	107

4.3.4.	Medições do consumo de energia elétrica e acompanhamento da distribuição do calor	108
4.3.5.	Sistema fotovoltaico	111
4.3.6.	Análise da viabilidade econômica do processo	113
4.3.6.1	<i>Estimativa de investimento no sistema fotovoltaico</i>	<i>113</i>
4.3.6.2	<i>Estimando os custos de produção</i>	<i>114</i>
4.3.6.4	<i>Custo do equipamento</i>	<i>115</i>
4.3.6.5	<i>Fatores econômicos</i>	<i>115</i>
4.3.7.	Quantificação da geração de carbono equivalente	117
4.4	CONCLUSÕES PARCIAIS	117
5	CONCLUSÃO	119
	REFERÊNCIAS	122
	APÊNDICE A - Investigação da relação entre a massa da banana e a quantidade de energia elétrica consumida durante o processo	130

DIAGRAMA CONCEITUAL

O QUE?

Analisar tecnológica e economicamente, por meio do aprimoramento energético, um secador de aquecimento-pulso de vácuo de pequena escala, com o auxílio de fontes renováveis, focado no pequeno produtor.

POR QUÊ?

A desidratação de frutas e hortaliças, por meio da secagem, agrega valor, gerando alimentos seguros, nutritivos e crocantes, ampliando o alcance a um vasto mercado.

- O semiárido produz frutas e hortaliças, mas quase não há industrialização dessas frutas, existindo elevada perda pós-colheita.
- A maioria das tecnologias de secagem faz o uso intensivo de tempo e energia.
- As novas tecnologias de secagem necessitam ser sustentáveis, com maior eficiência energética e menores custos operacionais e resultar em produtos de qualidade superior.

O QUE JÁ FOI FEITO?

- Obtenção de frutas desidratadas crocantes por diferentes técnicas de secagem, cinética de secagem, propriedades físico-químicas, mecânicas e acústicas, estruturais e nutricionais; correlação sensorial, influência da taxa de descompressão e comparações com as secagens tradicionais;
- Análise de eficiência energética para processos de secagem convencionais e não convencionais (solar híbrido, bombas de calor, vácuo, micro-ondas, vapor superaquecido, eletrotecnologias, aquecimento ôhmico, adsorção, janela da refração, entre outros.).

HIPÓTESES

- É possível melhorar a eficiência energética de um secador de aquecimento-pulso de vácuo de pequena escala possibilitando a redução dos custos operacionais e dos impactos ambientais.
- O uso de energias renováveis nos secadores de aquecimento-pulso de vácuo de pequena escala torna o processo economicamente e tecnologicamente viável.

RESULTADOS ESPERADOS

- Compreensão e o conhecimento dos benefícios econômicos, estratégicos, sociais e ambientais obtidos ao promover a melhoria da eficiência energética na secagem.
- Fornecer informações relevantes para auxiliar pequenos produtores, investidores e formuladores de políticas na tomada de decisões.
- Contribuir para o desenvolvimento sustentável, proporcionando vantagens econômicas, estratégicas e redução do impacto ambiental.

1 INTRODUÇÃO

As condições climáticas nas diferentes regiões do Brasil favorecem a produção de uma grande variedade de frutas tropicais. Na Região Nordeste, em particular, destaca-se a produção de frutas como abacaxi, manga, caju e banana (Barbosa, 2014).

Devido à natureza perecível e delicada das frutas tropicais, é comum enfrentarem altos índices de perdas durante o processo de pós-colheita, transporte e armazenamento. A utilização de técnicas inadequadas é um dos principais fatores que contribuem para uma perda estimada de 17% dos alimentos entre a colheita e as prateleiras dos supermercados e armazéns (ONU, 2022).

A expansão de atividades produtivas insustentáveis, somadas à poluição, contribui para o declínio global da biodiversidade, ameaçando a produção alimentar e o futuro do setor agrícola, conforme relatório da FAO (2019).

A secagem é uma alternativa viável para minimizar as perdas de frutas, pois ajuda a aumentar a vida útil desses produtos, reduzir o peso e volume para transporte e armazenamento, além de diminuir os custos. Esse processo também desempenha um papel importante na diversificação da oferta de produtos, tornando-os mais acessíveis, facilitando o consumo e gerando renda.

A energia elétrica é usada por 79% das empresas, podendo constituir mais de 40% de seus custos de produção, sendo considerado um insumo essencial e estratégico, segundo FIRJAN (2017). Neste cenário, o aumento nas tarifas elétricas demanda a transferência desses acréscimos aos consumidores. Isso, por sua vez, frequentemente reduz a produção, empregos e eleva o custo de vida.

Na indústria alimentícia, o processo de secagem é uma das etapas que demanda maior consumo de energia. Além do impacto nos custos energéticos, a legislação ambiental referente à poluição e a crescente demanda por tecnologias sustentáveis e ecologicamente amigáveis têm impulsionado a busca por processos de secagem que sejam energeticamente eficientes nesse setor (Rahman e Conrad, 2007).

Preocupações globais com as mudanças climáticas, decorrentes das emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente do dióxido de carbono

proveniente de combustíveis fósseis, destacam-se. O Protocolo de Quioto, estabelecendo metas vinculativas para a redução de emissões entre países industrializados, visava conter o aumento global da temperatura a 2°C (Bohringer, 2003). O recente acordo climático de Glasgow na COP26 reforçou essas metas, buscando limitar o aumento a 1,5°C, com objetivos ambiciosos de redução de emissões e a meta de neutralidade de carbono até 2050. Essa conquista demanda abordagens integradas, combinando políticas eficazes e avanços tecnológicos, incluindo eficiência energética, eletrificação, energias renováveis e tecnologias de captura e armazenamento de carbono. As energias renováveis, indicadas pela IEA (2021), desempenham papel crucial na redução de emissões em diversos setores, sendo fundamentais para combater as mudanças climáticas.

O investimento sustentável, abrangendo aspectos meio ambiente, questões sociais e práticas de governança corporativa (ESG - *Environmental, Social, and Governance*), ganha destaque, com investidores reconhecendo a importância do desempenho sólido em ESG, indicando resiliência e competitividade (Pedersen et al., 2021; Pástor et al., 2022; Ling et al., 2023; Li et al., 2022).

Hsu et al. (2022) definem sustentabilidade como o uso do crescimento econômico para construir uma sociedade mais justa, preservando ecossistemas e recursos naturais, destacando a necessidade de uma análise 3E (Energy/exergy, Environmental, and Economic).

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) têm implicações na engenharia, abordando áreas como segurança alimentar, energia limpa, produção sustentável, inovação e enfrentamento das mudanças climáticas.

Para pequenos produtores que utilizam de secadores com materiais básicos e produtos de baixo custo, a redução do consumo de energia é fundamental, pois afeta diretamente os custos operacionais. Por outro lado, para os produtores de produtos de alto valor agregado, o desempenho energético também é de grande interesse, embora a parcela de energia nos custos totais dos produtos seja relativamente pequena (Kudra, 2004).

A melhoria do desempenho da secagem depende da eficiência energética e da implementação de novos sistemas e equipamentos capazes de reduzir as perdas de energia. Além do aspecto econômico, a conservação de energia também contribui para a preservação do meio ambiente e das reservas de combustíveis. A

adoção de fontes de energia renovável, como a solar e a eólica, é uma alternativa que pode minimizar a dependência excessiva de combustíveis fósseis na secagem industrial (Saravacos e Kostaropoulos, 2015).

Em consonância com a crescente demanda por alimentos práticos, convenientes e saudáveis, um lanche rápido feito com frutas desidratadas é uma opção saborosa, nutritiva e de fácil transporte. Além disso, a agregação de valor e qualidade dos produtos desidratados traz benefícios aos pequenos produtores ao reduzir suas perdas e aumentar sua renda. Essa tendência contribui para impulsionar a economia local e promover o desenvolvimento sustentável.

Novas técnicas de secagem podem oferecer benefícios significativos na produção de frutas e hortaliças desidratadas, resultando em alimentos crocantes, seguros, saudáveis e saborosos. Essas técnicas são capazes de promover uma estrutura com alta porosidade, baixa umidade e menor atividade de água, ao mesmo tempo que buscam a redução do tempo de processamento. Além disso, o uso de temperaturas moderadas preserva a cor e os compostos bioativos do produto (Zotarelli *et al.*, 2012; Link, 2017a).

Contudo, há uma lacuna de conhecimento sobre os custos, eficiência energética e ambiental na aplicação de técnicas de secagem em pequena escala, especialmente voltadas para pequenos produtores (Abdelouahab Benseddik *et al.*, 2020; Roratto, 2019; Link, 2016; Porciuncula, 2015; Zotarelli, 2012). Com a crescente competitividade da energia solar, ela emerge como uma alternativa viável para a redução de custos, justificando sua integração à matriz elétrica brasileira (Bezerra, 2021). Na região Nordeste, os níveis de irradiação solar e a produção de frutas tropicais favorecem a adoção de secadores solares para diminuir o consumo de energia elétrica.

Esta tese visa aprimorar a eficiência energética de um sistema de secagem por aquecimento-pulso de vácuo em pequena escala, buscando compreender os benefícios econômicos, estratégicos, sociais e ambientais. Seu propósito é oferecer informações relevantes para orientar pequenos produtores, investidores e formuladores de políticas. Ao impulsionar a eficiência energética na secagem, almeja-se contribuir para o desenvolvimento sustentável, gerando vantagens econômicas, estratégicas e sociais, enquanto se minimiza o impacto ambiental.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desta tese é realizar uma análise detalhada, abordando dimensões tecnológicas e econômica, com propósito de melhorar a eficiência energética de um secador de aquecimento-pulso de vácuo de pequena escala, com ênfase no pequeno produtor, mediante a incorporação de fontes de energia renovável.

1.1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Analisar e selecionar secadores de alimentos para identificar as lacunas necessárias de melhorias econômicas;
- b) Realizar testes para identificar os requisitos necessários para a melhoria do processo de secagem.
- c) Desenvolver uma análise energética do equipamento de secagem;
- d) Identificar as perdas e as possibilidades de melhorar a eficiência energética do processo de secagem;
- e) Propor e realizar experimento para tornar o processo mais eficiente e reduzir os custos em função da escala e condições de processamento do fruto;
- f) Desenvolver um estudo para avaliar a rentabilidade econômica das possíveis melhorias na eficiência energética do equipamento; e
- g) Desenvolver um estudo para avaliar os impactos ambientais, através da mensuração da diminuição das emissões de carbono equivalente.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho segue uma estrutura organizada em capítulos.

O primeiro capítulo inicia com a justificativa, os objetivos delineados para a pesquisa e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo abrange a revisão bibliográfica, enfocando os principais métodos de secagem, uma revisão sobre a banana, fruta que servirá como referência nos experimentos. Além disso, este capítulo explora considerações sobre o consumo energético no processo de secagem, incluindo uma análise das fontes de energia solar, bem como aspectos ambientais associados à secagem.

No terceiro capítulo, é apresentado um estudo energético detalhado em um secador de aquecimento-pulso de vácuo, que utiliza aquecimento de água proveniente de coletores solares. Isso envolve dimensionamentos, balanços de massa e energia, medições do consumo elétrico dos equipamentos de apoio, análise de viabilidade econômica, considerando os custos de produção e indicadores econômicos relevantes, além da avaliação da pegada de carbono equivalente.

O quarto capítulo concentra-se no dimensionamento, na montagem e na realização do experimento, com ênfase no sistema de aquecimento com resistência elétrica, mantendo a fonte de energia renovável, mas alterando o método de geração. Este capítulo também inclui análises de consumo e eficiência energética, bem como uma avaliação econômica e de emissões de carbono equivalente.

Por fim, o quinto e último capítulo apresenta as conclusões finais, consolidando os principais achados e destacando as contribuições deste trabalho para o campo de estudos em questão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SECAGEM

A secagem industrial é uma operação unitária fundamental amplamente empregada em diversos setores industriais, tais como químico, alimentício, mineral, celulose e papel, madeireiro, têxtil, entre outros (Kudra, 2004).

Os princípios físicos e de engenharia da secagem são bem discutidos na literatura como Saravacos e Kostaropoulos (2016), Rahman (2009), Kudra e Mujumdar (2009), Brennan (2006), Mujumdar (2006), Fellows (2000), entre outros.

A preservação de frutas, hortaliças e outros alimentos é crucial para garantir sua disponibilidade para consumo por um período prolongado sem afetar a qualidade do produto. A retirada de água durante a secagem resulta na redução da massa e do volume do alimento, proporcionando vantagens em termos de economia e praticidade no armazenamento e transporte, além de prolongar sua vida útil (Singh e Heldman, 2009).

Frutas e hortaliças são extremamente sensíveis devido à sua composição distinta em relação a outros materiais, o que influencia significativamente o comportamento desses alimentos durante a secagem e o armazenamento. Como resultado, eles são considerados produtos altamente perecíveis e sujeitos à deterioração rápida (Sagar e Kumar, 2010). De fato, perdas na faixa de 30% a 50% são comuns em frutas e hortaliças desde a produção até o consumo final (Hasan *et al.*, 2019).

No caso dos frutos é comum apresentarem um elevado teor inicial de água, alta suscetibilidade à temperatura (o que pode afetar a cor, sabor, textura e valor nutricional, levando à deterioração térmica) e uma redução de tamanho durante o processo de secagem (Karim e Hawlader, 2005).

Conforme Saravacos e Kostaropoulos (2016), existem mais de 40 categorias e mais de 100 subclasses de secadores, agrupados por diversos critérios, tais como o modo de operação (batelada ou contínuo), a natureza da alimentação (líquida, suspensão, pasta, grânulos, sólidos fibrosos, sólidos porosos, sólidos densos, filme etc.), o método de aquecimento (por convecção, condução, radiação e dielétrico) e a sensibilidade do produto (operação a vácuo, altas e

baixas temperaturas). Quanto ao porte, os secadores podem ser classificados como pequenos (até 50 kg/h), médios (50-1000 kg/h) e grandes (acima de 1000 kg/h).

Strumillo, Jones e Zylla (2014) resumiram algumas características encontradas na secagem no Quadro 1.

Quadro 1 - Algumas características encontradas na secagem

Modo de aquecimento	Condução, convecção, dielétrica e radiação
Fontes de energia	Carvão, petróleo, gás natural, energia elétrica, resíduos e energia solar
Pressão	Alto vácuo (liofilização), vácuo, pressão atmosférica e alta pressão
Escala	De 10 kg/h a >100 t/h
Tipo de equipamento	Cerca de 100 tipos de secadores identificados são usados no mundo
Limitação da taxa de processo	Camada limite, difusão interna e camada limite com difusão interna
Tamanho e forma do material	Pó, grânulos, folha, filme e placa
Propriedades do material	Não poroso, capilar-poroso e higroscópico; solução, xarope, lama, gel, material extrudado, cristalino, tecido, papelão e fibra.
Teor de umidade inicial	De quase seco (<1% kg/kg de material seco) a saturação total (>100% kg/kg de material seco)
Sensibilidade térmica do material	De material sensível à temperatura (<30 °C) a materiais pouco sensíveis a temperaturas elevadas (>200 °C)
Valor do produto	De produtos químicos a granel (<\$70 / t de material seco) a produtos farmacêuticos produtos (> \$ 150.000 / t)
Padrão de uso de energia para secagem	No setor de alimentos e agricultura: 46,3 x 10 ⁹ MJ/ano na indústria francesa e 35 x 10 ⁹ MJ/ano na indústria britânica.

Fonte: Adaptado de Strumillo, Jones e Zylla (2014).

Conforme Onwude *et al.* (2017), a seleção da técnica de secagem mais apropriada depende de diversos fatores, como o tipo de produto, condições de

secagem, eficiência e custo operacional. Além disso, outros parâmetros importantes a serem considerados na escolha incluem o consumo de energia e a qualidade final do produto.

O estudo de Hasan *et al.* (2019) analisou diversos métodos de secagem e seus efeitos na conservação, eficiência, custos e qualidade de frutas e vegetais classificados. Algumas novas técnicas de secagem, como secagem solar, micro-ondas, secagem a vácuo, secagem por infravermelho e forno, bem como secagem híbrida, foram destacadas por serem mais eficientes em termos de uso de energia e tempo, em comparação com as técnicas tradicionais de secagem.

Existem várias técnicas de secagem adequadas para reduzir perdas e preservar frutas e hortaliças, que podem ser avaliadas com base na eficiência energética, no tempo de secagem e na qualidade do produto. É necessário encontrar um equilíbrio entre esses fatores para alcançar o objetivo econômico do processo de fabricação, assegurando que os alimentos sejam entregues ao consumidor com segurança e saborosos (Chen e Mujumdar, 2008).

As técnicas de desidratação são alvo de contínuos estudos visando aprimorar a qualidade dos produtos, melhorar a eficiência energética e reduzir o tempo de processamento.

A produção de alimentos com valor agregado e características distintas tem levado a um amplo uso da secagem de frutas. Embora existam vários métodos de secagem disponíveis, apenas alguns permitem a produção de frutas crocantes, tais como fritura, liofilização, *puff-drying* e secagem por ciclo de aquecimento-pulso de vácuo (Monteiro, 2014).

2.1.1. Secagem por fritura

No processo de fritura, a superfície do alimento em contato com o óleo ou gordura quente se aquece rapidamente e começa a secar. Com isso, cria-se um gradiente de concentração e a água presente no interior do alimento migra para a sua superfície.

O óleo atua como o meio de transferência de energia para o produto. As altas taxas de transferência de calor entre o óleo e o produto levam à remoção de

água do produto de maneira bastante rápida e eficiente, promovendo modificação de textura (Torezan, 2005).

Substâncias termossensíveis são perdidas durante o processo, ao mesmo tempo em que ocorre absorção do óleo pelo alimento. As frutas em geral não são tratadas por esse método de conservação, porque a absorção de óleo durante o processamento altera as características de cores, sabor e aroma característicos na crosta dos alimentos fritos, podendo prejudicar a aceitação dos consumidores (Querido, 2005).

Reynes, Aymard e Aw (1997) *apud* Torezan (2005) conduziram uma investigação sobre a produção de *chips* de abacaxi por meio de um processo combinado de desidratação osmótica e fritura. Quanto ao processo de fritura, as condições mais eficazes foram a uma temperatura de 150°C mantida por 150 segundos. O produto apresentou características desejáveis, como textura crocante, baixo teor de óleo, atividade de água reduzida e um bom rendimento em matéria seca.

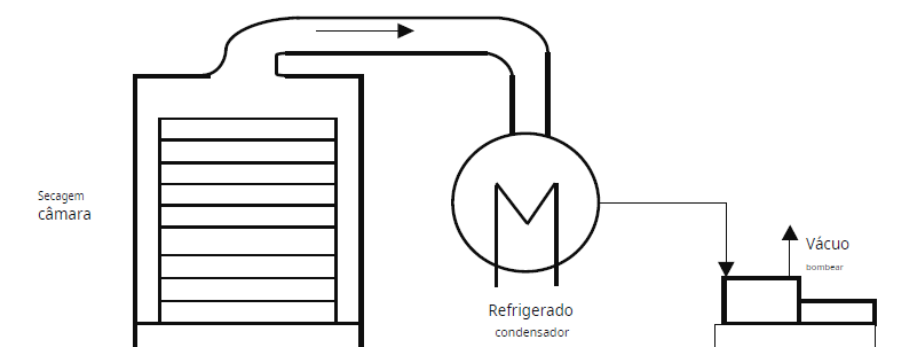
A vida de prateleira de produtos fritos está primariamente relacionada à sua umidade pós-fritura. A avaliação da oxidação dos produtos fritos durante o armazenamento é essencial e deve ser adaptada a cada situação, levando em consideração o tipo de embalagem utilizada. No caso de produtos fritos que mantenham um elevado teor de umidade, é recomendável seu consumo imediato após a preparação ou armazenamento por um período relativamente curto, dado o processo de oxidação das gorduras. Alternativamente, outra opção viável é a preservação desses produtos por meio de refrigeração ou congelamento (Mujumdar, 2006).

2.1.2. Secagem por liofilização

A liofilização é um processo de secagem no qual a água do alimento é congelada a baixas temperaturas e posteriormente sublimada, passando do estado sólido diretamente para a fase de vapor, o que promove a preservação da integridade do produto, resultando em alimentos com uma estrutura altamente porosa de fácil reidratação (Oetjen e Haseley, 2004).

A Figura 1 apresenta o diagrama de um liofilizador composto por três componentes principais: a câmara de amostra, o condensador e um sistema de bomba de vácuo.

Figura 1 - Diagrama de um liofilizador que opera em batelada



Fonte: Saravacos e Kostaropoulos (2016).

Indicado para produtos termolábeis de alto valor agregado, a liofilização causa reduzida alteração das propriedades nutritivas e das características sensoriais (cor, aroma e sabor), pois as membranas das células não se rompem com a perda do vapor de água (Menon, Stojceska e Tassou, 2020; Oikonomopoulou *et al.*, 2011; Ratti, 2001).

O desempenho da liofilização depende significativamente do processo de congelamento. O tipo e a velocidade de congelamento têm grande efeito na estrutura final do alimento, porque a distribuição dos poros no alimento depende do tamanho e da localização dos cristais de gelo formados.

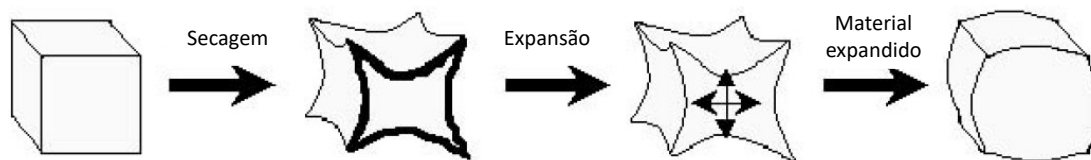
As desvantagens tecnológicas da liofilização são seus custos associados ao alto consumo de energia necessário para o congelamento e sublimação a vácuo, além do longo tempo de processamento, entre 12 e 24 horas (Singh e Heldman, 2009).

2.1.3. Secagem por *puff-drying*

O processo de *puff-drying* é realizado expondo um produto parcialmente desidratado, relativamente pequeno, à alta pressão e à alta temperatura por um curto período, após o qual, o produto é descomprimido até a pressão atmosférica (Singh e Heldman, 2009).

A Figura 2 ilustra o mecanismo do efeito expansão (*puffing effect*).

Figura 2 – Representação esquemática do mecanismo de expansão



Fonte: Adaptado de Varnalis, Brennan e Macdougall (2001).

Com o aumento da pressão, a água contida no alimento atinge temperaturas superiores às de ebulição na pressão atmosférica (Sullivan e Craig, 1984). A depressurização resulta em uma rápida evaporação da água, causando uma expansão ou ruptura da estrutura (Payne *et al.*, 1989; Varnalis *et al.*, 2001).

Os produtos produzidos têm porosidade muito alta, com características de reidratação rápida. O uso do processo *puffing* na desidratação de bananas resultou em taxas mais rápidas de secagem e reidratação devido à formação de uma estrutura mais porosa. O produto reteve cor, sabor e textura característicos (Saca e Lozano, 1992).

A ocorrência do fenômeno de *puffing* durante o processo de vácuo está relacionada às condições operacionais, incluindo temperatura, pressão inicial e final, bem como o tempo de descompressão (Louka e Allaf, 2002). É importante considerar as características intrínsecas do produto em tratamento, como suas propriedades físicas, reológicas e termodinâmicas, pois as distribuições de tamanhos de poros em uma amostra influenciam suas propriedades mecânicas e principalmente a textura.

2.1.4. Secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo

A técnica de secagem por aplicação de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV) é fundamentada em princípios termo-mecânicos. O processo consiste em uma sequência de etapas, começando pelo aquecimento controlado do material à pressão atmosférica. Posteriormente, ocorre a redução brusca da pressão do sistema, seguida pelo reaquecimento das amostras. O ciclo de vácuo é

repetido até que o produto alcance a baixa umidade e atividade de água desejadas. Essas etapas são cuidadosamente executadas com o objetivo de promover uma desidratação eficiente das amostras, resultando em um produto de alta qualidade.

A etapa de aquecimento pode ser conduzida utilizando diferentes métodos, como o aquecimento por ar quente (*convective multi-flash drying* - CMFD) (Zotarelli *et al.*, 2012), o contato com placas aquecidas (*conductive multi-flash drying* - KMFD) (Porciuncula *et al.*, 2016; Link *et al.*, 2017a e 2017b), ou por meio de micro-ondas (*microwave multi-flash drying* - MWMFD) (Monteiro *et al.*, 2016).

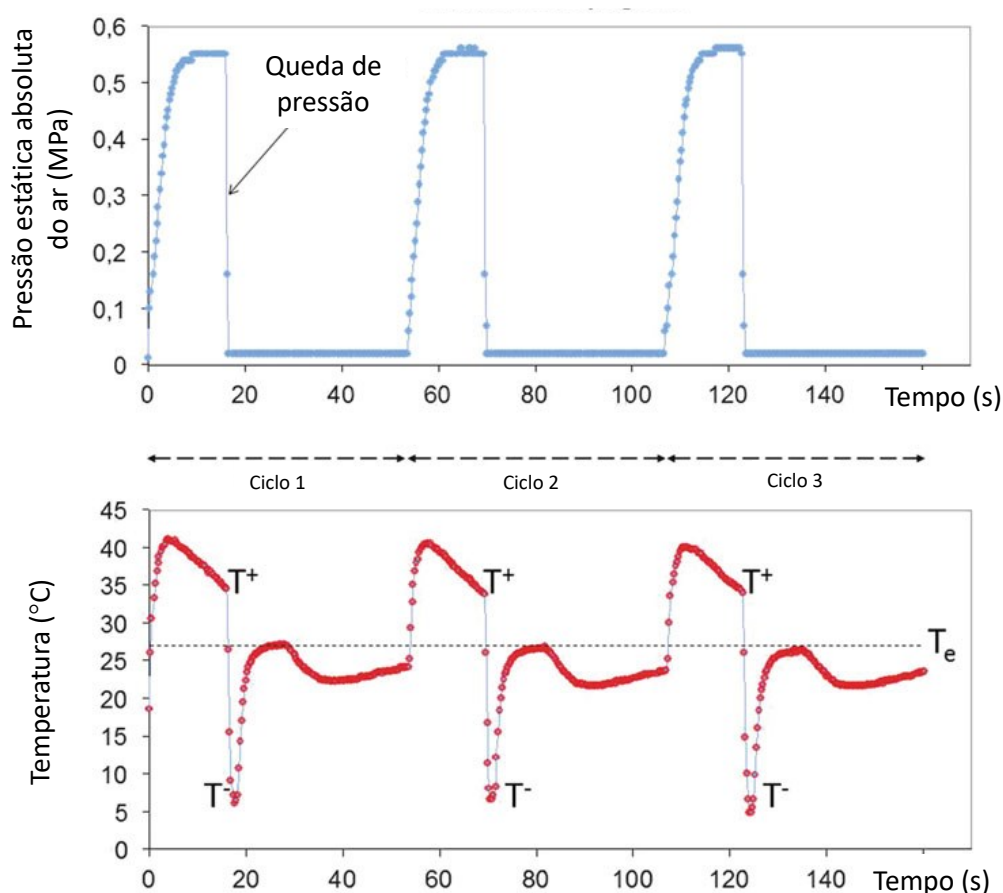
A rápida evaporação da água e o conseqüente resfriamento do produto resultam na desidratação e texturização, conferindo ao produto propriedades mecânicas semelhantes às encontradas em frutas liofilizadas comerciais, caracterizadas por sua textura crocante (Zotarelli, 2010). Além disso, esse processo de secagem reduz o tempo de processamento, enquanto preserva a cor do produto devido ao uso de temperaturas moderadas (Zotarelli *et al.*, 2012; Link, 2017a).

O processo de secagem por CAPV tem demonstrado ser uma operação de secagem altamente eficaz, caracterizada pela sua capacidade de proporcionar um aquecimento homogêneo e profundo, permitindo a remoção efetiva da água residual, livre ou ligada, a partir da matriz porosa. Esse procedimento é conduzido por meio da aplicação da lei de transferência de vapor de Darcy, em que o gradiente de pressão total age como a força motriz subjacente (Allaf, T., e Allaf, K., 2014).

A técnica de secagem por CAPV exerce influência na formação da estrutura do produto seco, principalmente devido à forma como a água é removida e às características do processo, como temperatura, pressão e tempo. As frutas secas após a aplicação da técnica apresentaram uma estrutura porosa. Essa porosidade é atribuída ao mecanismo de desidratação adotado durante o processo de secagem, contribuindo para a obtenção de uma textura desejável no produto (Zotarelli, 2010).

A Figura 3 ilustra o processo de secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, com as variações de pressão e temperatura durante as aplicações dos ciclos.

Figura 3 - Evolução de pressão e temperatura vs. tempo durante o processo de secagem por ciclos sucessivos de aquecimento-pulso de vácuo



Fonte: Adaptado de Allaf, T., e Allaf, K. (2014).

2.2 SECAGEM POR CICLOS DE AQUECIMENTO-PULSO DE VÁCUO (CAPV): AVANÇOS TECNOLÓGICOS E O ESTADO DA ARTE

A implementação de controles automáticos nos secadores pode resultar em uma redução no consumo de energia. Esses controles garantem condições operacionais ideais em termos de consumo de energia e qualidade do produto. A adaptação das condições de secagem aos parâmetros específicos do material geralmente leva a tempos de secagem mais curtos, evitando a secagem excessiva do produto e reduzindo o consumo de energia (Strumiłło, Jones e Zylka, 2014).

Os principais parâmetros considerados na avaliação do produto incluem a cor, o sabor, o aroma e a textura. O processo de secagem não apenas afeta o teor de água, mas também influencia as características físicas, químicas e bioquímicas

do alimento, como atividade enzimática, deterioração microbiana, textura, viscosidade, aroma, sabor e palatabilidade. A remoção da água durante a secagem frequentemente resulta em contração da matriz sólida, o que pode afetar significativamente a aparência e a integridade do produto.

A crocância de um produto pode ser influenciada tanto pela sua composição natural quanto pelo método de secagem utilizado. A obtenção de uma textura crocante requer uma estrutura sólida, porém frágil, que sofra fraturas sucessivas quando submetida a uma força. Durante o processo de secagem, a microestrutura do alimento passa por modificações, reestruturação e reorganização, resultando em uma estrutura final do produto desidratado que é dependente da natureza do material e das condições de secagem empregadas. Estudos têm mostrado que o processo e as condições de secagem têm uma forte influência na densidade, porosidade e encolhimento dos frutos (Porciuncula, Segura e Laurindo, 2016).

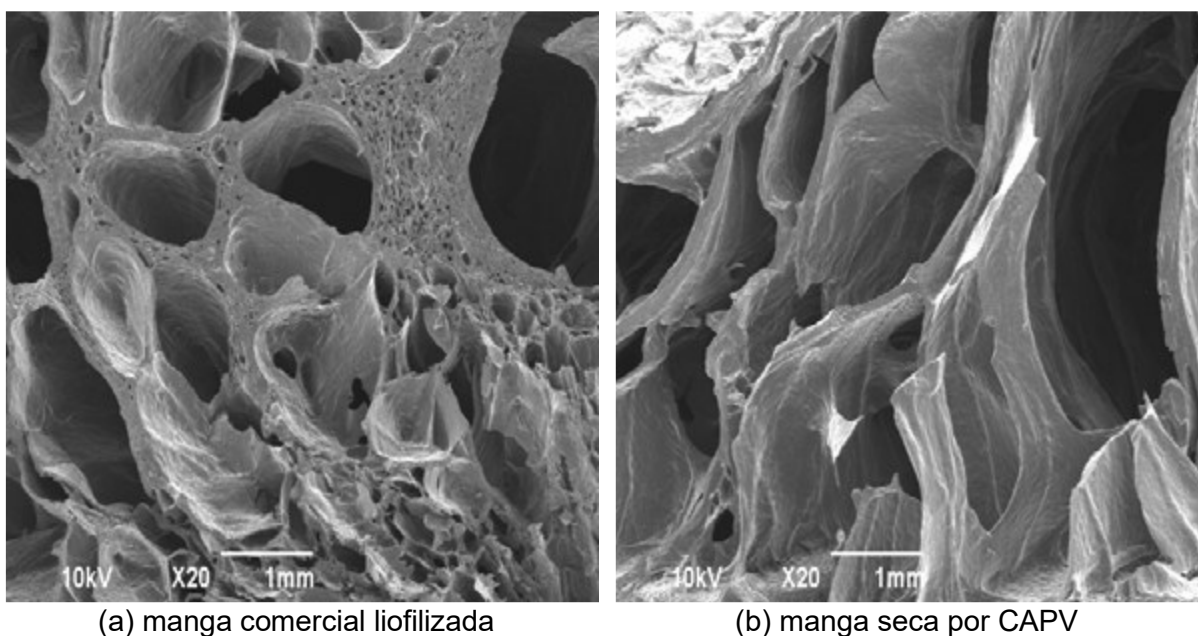
Em comparação com o processo convectivo de secagem, o método de CAPV demonstrou uma redução significativa no tempo de secagem. Além disso, foi observado que as amostras não apresentaram o escurecimento característico das amostras secas pela técnica convectiva. A aplicação de pulsos de vácuo durante o processo resulta na formação de uma estrutura porosa, acelerando a remoção da umidade da amostra (Porciuncula, 2010).

Zotarelli (2010) realizou um estudo comparativo de diferentes estratégias de desidratação para a obtenção de frutas desidratadas de qualidade superior. Observou que além de possibilitar a obtenção de produtos com baixos teores de umidade e atividade de água ao final da secagem, as frutas secas por aplicação de CAPV apresentaram textura crocante, evidenciada pelas curvas irregulares obtidas nos ensaios mecânicos. Através das análises de microscopia eletrônica de varredura foram verificadas a formação da matriz porosa e a semelhança da estrutura das amostras secas por CAPV com as amostras comerciais liofilizadas. O estudo não apresenta informações relacionadas aos custos inerentes ao processo, no entanto, sugere que a aplicação do método de secagem por CAPV manifestou-se como mais eficiente em comparação com a secagem convencional. Isso se deve ao fato de que esse procedimento possibilitou a obtenção de frutas

desidratadas com reduzido teor de umidade em um intervalo temporal inferior durante o processo de secagem.

A Figura 4 ilustra a estrutura porosa da fruta comercial liofilizada e seca por CAPV, demonstrando o efeito da técnica de secagem na formação da estrutura do produto desidratado. Esse efeito é influenciado pela maneira como é feita a remoção de água do produto, bem como pelas características específicas do processo, como temperatura, pressão, tempo, entre outros.

Figura 4 - Micrografias com aumento de imagem de 20x: (a) fratura de manga comercial liofilizada; (b) fratura de manga seca por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV).



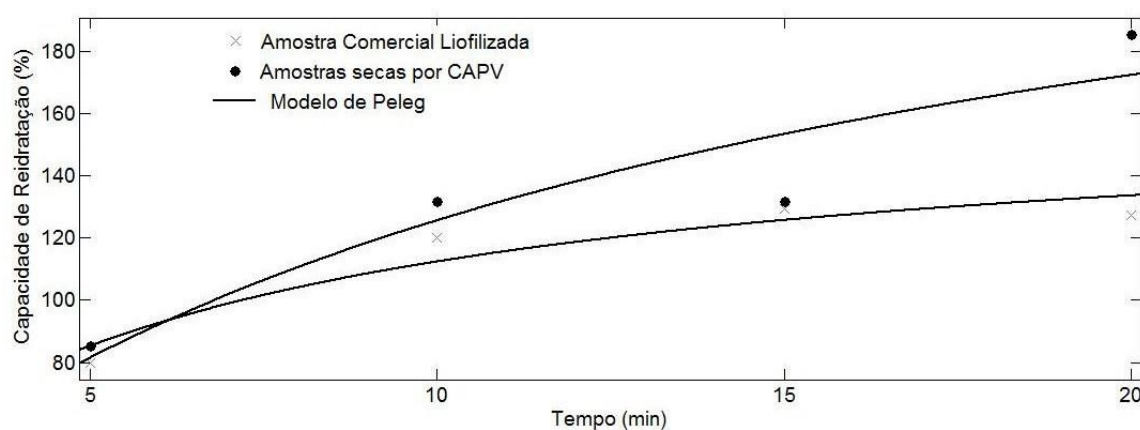
Fonte: Zotarelli (2010)

No estudo de Porciuncula (2010), as bananas prata foram submetidas a um processo de desidratação por CAPV, empregando ar quente como fonte principal de aquecimento. Após a realização de 12 ciclos desse procedimento, as amostras atingiram um teor de umidade de 0,294 g de água por grama de sólidos secos em um período de 135 minutos, com uma atividade de água de 0,277, comparável às bananas liofilizadas comerciais (0,276). Análises de penetração revelaram padrões semelhantes nas curvas de força versus deformação entre as amostras, evidenciando a obtenção da textura desejada. A técnica de CAPV destacou-se pela notável redução no tempo de secagem em 6,5 horas, atribuível à formação de uma

estrutura porosa induzida pelos pulsos de vácuo, acelerando a extração de umidade. O estudo não fornece informações específicas sobre os custos associados ao procedimento, porém enfatiza a importância de fontes de energia sustentáveis para melhorar a eficiência energética na desidratação.

Conforme ilustrado na Figura 5, tanto as amostras de frutas *in natura* secas por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo quanto as amostras comerciais liofilizadas demonstraram um aumento na capacidade de reidratação à medida que o tempo de contato avançava.

Figura 5 - Capacidade de reidratação das amostras de banana *in natura* secas por CAPV e amostras de banana comercial liofilizada



Fonte: Porciuncula (2010).

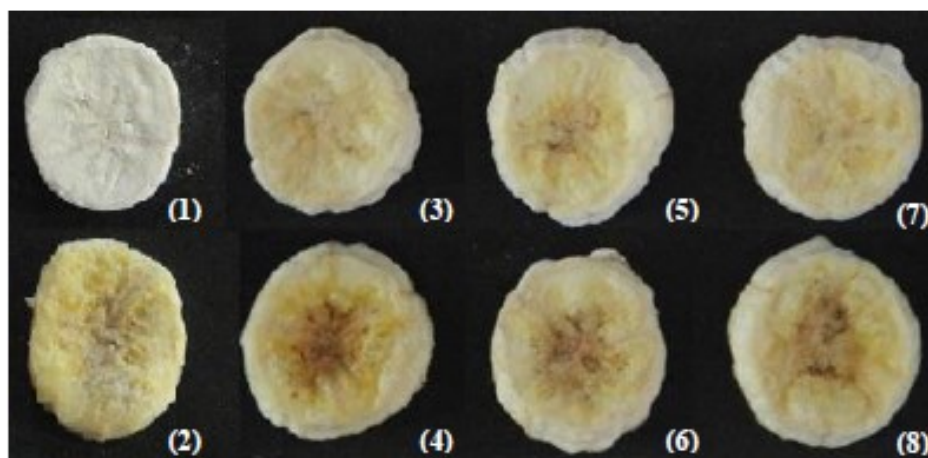
Zotarelli *et al.* (2012) compararam o ciclo de aquecimento pulso de vácuo (CAPV) com outros métodos de secagem, como secagem convectiva, secagem a vácuo e liofilização, na produção de frutas crocantes. O CAPV resultou em produtos com maior porosidade, taxa de reidratação e textura mais macia. Além disso, as frutas CAPV mostraram menor atividade de água, sugerindo maior estabilidade microbiológica. As bananas submetidas ao processo CAPV apresentaram atividade de água de $0,276 \pm 0,015$ e maiores teores de sólidos solúveis em comparação com a secagem por micro-ondas. O estudo menciona que o processo de ciclo de aquecimento pulso de vácuo pode ser concluído em tempos mais curtos e a custos mais baixos do que a liofilização. No entanto, o texto não fornece informações específicas sobre os valores dos custos ou eficiência em comparação com a liofilização.

Porciúncula (2014; 2015) realizou pesquisas que visavam desenvolver e avaliar frutas desidratadas com propriedades de textura e microestrutura controladas. A pesquisa investigou uma abordagem alternativa de aquecimento para as frutas, empregando a transferência de calor por condução, por meio do contato direto de fatias de frutas com uma placa aquecida. Foi analisada a influência de diferentes métodos de secagem na formação da microestrutura e nas propriedades mecânicas de textura de bananas (var. Prata). Verificou-se que aumentar as temperaturas na câmara durante o processo de secagem resultou em um tempo de secagem ligeiramente reduzido, mas também em maior encolhimento e menor porosidade nas amostras. As amostras submetidas a temperaturas mais baixas exibiram maior porosidade, menos encolhimento e textura mais crocantes. O estudo destaca a importância de selecionar o método de desidratação adequado para controlar a microestrutura das frutas desidratadas. Embora sugira que a secagem a vácuo possa economizar tempo e energia, não oferece dados específicos sobre consumo e eficiência energética.

No estudo conduzido por Monteiro (2014), foi investigado o impacto da aplicação de pulsos de vácuo durante o processo de desidratação de frutas utilizando micro-ondas. Os resultados revelaram uma notável redução no tempo de secagem quando a potência do micro-ondas foi incrementada. Além disso, a desidratação por micro-ondas demonstrou proporcionar resultados equiparáveis ou até superiores, em termos de propriedades físico-químicas, aspecto visual e microestrutura, em comparação com a técnica de liofilização. Embora as frutas desidratadas por micro-ondas apresentassem menor teor de umidade, maior porosidade, menor volume específico e resistência à penetração, elas mantiveram uma qualidade superior em relação à cor, textura e sabor. O autor enfatiza a eficácia em termos de economia de custos e duração do processo.

A Figura 6 exibe a fotografia das bananas secas por liofilização no laboratório, comercial liofilizada, por micro-ondas sob vácuo (MV) com potência de 400 W, 700 W, 1000 W e por micro-ondas com vácuo intermitente (MVMFD) com potência de 400 W, 700 W e 1000 W.

Figura 6 - Fotografia das bananas secas por liofilização no laboratório (1), comercial liofilizada (2), por MV – 400 W (3), 700 W (5), 1000 W (7) e por MVMFD - 400 W (4), 700 W (6) e 1000 W (8).



Fonte: Monteiro (2014).

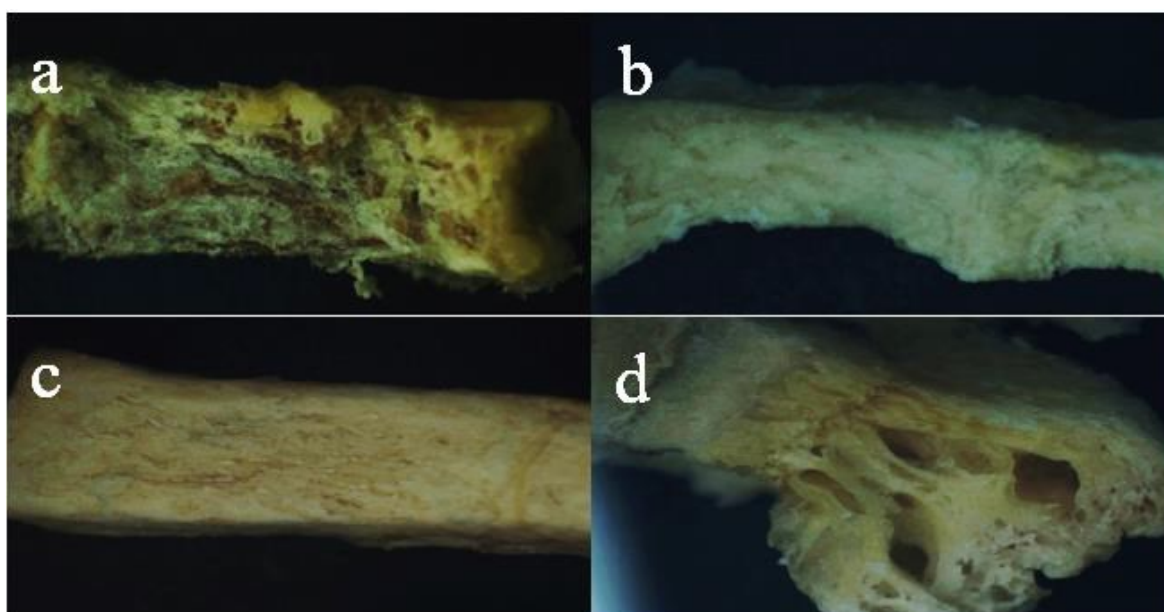
Porciuncula, Segura e Laurindo (2016) investigaram o impacto de diferentes métodos de secagem e variáveis do processo na microestrutura e textura de bananas desidratadas da variedade Prata. O estudo visou melhorar a estrutura porosa das bananas desidratadas para aumentar sua qualidade e vida útil. As técnicas avaliadas incluíram secagem condutiva com ciclo de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV), CAPV combinada com secagem a vácuo (CAPV-VD), secagem convectiva em forno (CD) e secagem a vácuo convencional (VD). O método CAPV-VD destacou-se ao produzir bananas desidratadas com a estrutura mais porosa e textura mais macias, indicando potencial para frutas de alta qualidade e durabilidade. Não houve análise econômica ou ambiental no estudo.

Link, Tribuzi e Laurindo (2017) conduziram um estudo abrangente sobre os efeitos de diferentes métodos de secagem na manga. Foram avaliadas as cinéticas de secagem, propriedades físicas, microestruturais e nutricionais, além da capacidade de reidratação das amostras. A técnica de secagem condutiva por múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV) se destacou, mostrando eficiência superior em comparação com métodos tradicionais. A manga seca por CAPV apresentou maior concentração de carotenoides e melhor preservação das propriedades nutricionais. Sua microestrutura era mais porosa e a cor mais clara em relação a outros métodos. Essas descobertas têm relevância para o desenvolvimento de métodos de secagem mais eficazes, que podem melhorar a

qualidade e o valor nutricional de frutas desidratadas. A pesquisa não incluiu detalhes específicos sobre os custos relacionados ao procedimento.

Andreani (2018) conduziu um estudo simultâneo das propriedades mecânicas e acústicas para avaliar a crocância de alimentos, correlacionando os resultados com avaliações sensoriais. Os resultados indicaram que a secagem por múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV) produz bananas com alta crocância sensorial, porosidade notável e picos em análises acústicas e mecânicas. Comparativamente, a liofilização resultou em espaçamentos intercelulares menores, enquanto a secagem por CAPV gerou poros maiores, contribuindo para uma textura mais crocante nas bananas. As bananas secas por CAPV foram tão preferidas pelos consumidores quanto as liofilizadas, promovendo o desenvolvimento de alimentos mais crocantes e aceitos pelos consumidores. Apesar de não abordar diretamente detalhes financeiros, a pesquisa destaca a importância de considerar aspectos econômicos na produção e avaliação de alimentos. A Figura 7 exibe as imagens das fraturas de bananas obtidas por cada um dos métodos de secagem.

Figura 7 - Imagens do estereoscópio óptico das bananas desidratadas por diferentes métodos de secagem (a) Secagem Convectiva, (b) Secagem a vácuo, (c) Liofilização e (d) CAPV todas com ampliação de 15 vezes.



Fonte: Andreani (2018).

No estudo conduzido por Roratto (2019), foi desenvolvido um secador de alimentos que utiliza energia solar térmica como fonte de calor, com o propósito de produzir frutas e hortaliças desidratadas com textura crocante e com baixa emissão de carbono. A pesquisa demonstrou que a desidratação pode ser realizada de forma uniforme, e as amostras de banana, desidratadas pelo método da secagem condutiva com ciclo de aquecimento-pulso de vácuo, combinada com secagem a vácuo contínuo (CAPV_VD), apresentaram baixos teores de umidade, atividade de água reduzida e alta porosidade, independentemente das taxas de descompressão aplicadas. A textura crocante foi confirmada por meio de análises de força-deformação, que evidenciaram irregularidades e múltiplos picos. Apesar de o estudo não abordar detalhes específicos relacionados aos custos, enfatiza-se o potencial de economia de custos associado ao uso da energia solar no processo de secagem de alimentos.

A pesquisa conduzida por Abdelouahab Benseddik *et al.* (2020) abordou os impactos de quatro métodos distintos de secagem nas características físico-químicas, na disponibilidade de substâncias bioativas e na atividade antimicrobiana do pó de abóbora potimarron. Os resultados destacaram a estreita correlação entre a disponibilidade de substâncias bioativas e o método de secagem, sendo essa relação influenciada pela porosidade do produto. O pó de abóbora potimarron obtido por meio do processo de secagem por múltiplos CAPV apresentou o mais elevado teor de flavonoides, superando de forma significativa as amostras secas por fluxo de ar e até mesmo as submetidas à liofilização. Importante ressaltar que o estudo não abordou informações referentes aos custos associados aos procedimentos de secagem utilizados.

Dessa forma, a tecnologia inovadora de desidratação por meio de ciclos sucessivos de aquecimento-pulso de vácuo demonstra a capacidade de produzir frutas desidratadas com teor de umidade, atividade de água e propriedades mecânicas semelhantes às encontradas em frutas liofilizadas comerciais. Isso é alcançado com uma notável redução no tempo de secagem, resultando em uma textura crocante característica das frutas desidratadas. No entanto, é fundamental a realização de estudos que abordem os custos envolvidos no processo e avaliem a eficiência energética associada a essa tecnologia.

2.3 BANANA

Uma das frutas mais consumidas no mundo, de grande valor socioeconômico e nutricional, a banana é explorada na maioria dos países tropicais e subtropicais. O cultivo de bananeira é feito predominantemente por pequenos e médios produtores, sendo uma importante fonte de renda para a unidade produtiva, pois tem uma produção praticamente constante ao longo do ano, gerando renda semanalmente (SEBRAE, 2008).

Os frutos da variedade Prata são de sabor agridoce agradável, com pH entre 4,5 e 4,7. São frutos de seção transversal, pentagonal, com cinco quinas bem visíveis, de tamanho médio, com 10 a 13 cm de comprimento; e 35 a 40 mm de diâmetro, com extremidade bem anunciada, pontuda, sem restos florais (Medina, *et al.*, 1995). Os cachos pesam de 9 a 12 kg e possuem, em média, 7,5 pencas (CEPLAC, 2020). A casca do fruto é fina, de cor amarelo-esverdeada, a polpa é creme-rósea-pálida, excelente para o consumo *in natura* (Porciuncula, 2010).

O fruto da bananeira contém vitaminas (A, B, C), minerais (Ca, K e Fe), carboidratos e lipídeos, além de conter aproximadamente 70% de água. O material sólido é formado principalmente de carboidratos, proteínas e gorduras, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Composição da banana prata por 100 gramas de parte comestível: centesimal, minerais e vitaminas.

Energia	Umidade	Carboidrato	Proteína	Lipídios	Fibra	Cálcio	Potássio	Ferro
(kcal)	(kJ)	(%)	(g)	(g)	(g)	(mg)	(mg)	(mg)
98	411	71,9	26,0	1,3	0,1	2,0	8	358
Vit. C	Vit. E	Vit. A	B1 Tiamina	B2 Riboflavina	B3 Niacina	B6 Piridoxina	B9 Folato	
(mg)	(mg)	(µg RAE)	(mg)	(mg)	(mg)	(mg)	(µg)	
21,6	-	16	-	0,02	-	0,10	-	

Fonte: Adaptado da Tabela Brasileira de Composição de Alimentos – TACO (2011)

A banana da variedade Prata é uma das cultivares mais proeminentes em termos de produção e consumo no Brasil, desempenhando um papel econômico

significativo no mercado interno do país. O cultivo dessa variedade ainda é caracterizado principalmente por sua dependência de mão-de-obra, comumente envolvendo pequenas unidades familiares de produção. Cada cacho de banana Prata possui um peso médio variando de 9 a 12 kg e geralmente contém cerca de 7,5 pencas, conforme informações disponibilizadas pela CEPLAC (2020).

Muito suscetível à deterioração e devido a técnicas inadequadas após a colheita, a banana as vezes chega ao mercado consumidor com aparência inadequada, provocando a depreciação do produto e prejuízos econômicos. Problemas de transporte e armazenamento nos meses de safra, somados a elevada perecibilidade dos frutos colaboram para uma perda em torno de 40% da produção nacional, provocando a necessidade de desenvolvimento de novos processos para sua utilização e conservação (Sousa *et al.*, 2003; Medina, 2004; Porciuncula, 2010).

2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE ENERGIA NA SECAGEM

A secagem de materiais é um processo intrinsecamente desafiador, uma vez que demanda o fornecimento de calor ou energia suficiente para viabilizar a evaporação da água, o que pode requerer uma quantidade significativa de energia, especialmente para solventes comuns, como a água, que demanda valores superiores a 2.250 kJ/kg (Çengel, 2009). Apesar dos esforços empreendidos pelas indústrias para reduzir o consumo de energia nesse contexto, a secagem enfrenta uma limitação termodinâmica peculiar, tornando a economia de energia uma tarefa mais complexa quando comparada a outros processos industriais.

A quantidade de energia consumida durante o processamento de produtos alimentícios varia significativamente de acordo com o tipo de produto, o equipamento utilizado, a infraestrutura disponível, a temperatura ambiente e a habilidade dos operadores envolvidos no processo (Roohinejad *et al.*, 2018).

Devido à grande variedade de materiais para secagem e equipamentos disponíveis, não é viável estabelecer um método padronizado para avaliar a eficiência de secagem. Nesse sentido, é fundamental estabelecer condições de teste específicas para cada tipo de secador a ser avaliado (Strumillo, Jones e Zylka, 2014).

As tecnologias convencionais de secagem empregados na indústria alimentícia são baseados em ar quente e, geralmente, são considerados processos intensivos em energia, com emissões mais elevadas de gases de efeito estufa, representando cerca de 15% das despesas totais de fabricação (Menon, A., Stojceska, V., & Tassou, S., 2020).

As novas tecnologias de secagem têm como principais objetivos a produção de produtos de melhor qualidade, operação em capacidades mais altas, com segurança e bom controle, além da redução do custo total, incluindo a diminuição do investimento em capital e a redução dos custos operacionais, como energia, manutenção e emissões (Kudra e Mujumdar, 2009).

Strumillo, Jones e Zylka (2014) salientam que a redução do consumo de energia pode ser abordada sob diferentes perspectivas, sendo as mais relevantes:

- a) Metodológica, por meio do desenvolvimento de métodos para reduzir o uso de energia;
- b) Tecnológica, com a utilização de fontes de energia secundárias, redução das perdas de calor para o ambiente e similares;
- c) Socioeconômica, por meio do estímulo à busca por potenciais fontes de energia;
- d) Organizacional, por meio da coordenação de processos visando o uso econômico de energia; e
- e) Ecológica, focando na busca de soluções seguras para o meio ambiente.

Kemp (2005) sugere diversas abordagens para reduzir o consumo de energia em secadores:

- a) Reduzir o consumo energético intrínseco para secagem;
- b) Melhorar a eficiência do secador, minimizando perdas de calor, fluxo de ar ou tempo de processamento;
- c) Implementar sistemas de recuperação de calor entre correntes quentes e frias dentro do processo de secagem;
- d) Facilitar a troca de calor entre o secador e processos adjacentes;
- e) Utilizar fontes de calor de baixa qualidade e custo reduzido para atender às necessidades energéticas;
- f) Cogeração de energia enquanto supre as demandas de calor do secador; e

- g) Incorporar bombas de calor para recuperar calor residual e fornecer aquecimento ao secador.

Melhorar a transferência de calor e massa por meio da redução do tempo de processo e do comprimento da máquina resulta em menores perdas de energia na unidade de produção. Além disso, ao fornecer calor com precisão onde é necessário, reduzindo assim o desperdício de energia no aquecimento de equipamentos periféricos, é possível aprimorar a eficiência energética em instalações de secagem (Strumillo, Jones e Zylła, 2014).

A identificação das perdas de energia em um sistema é essencial para melhorar a eficiência energética e reduzir os custos. No entanto, é importante ressaltar que o consumo de energia do secador deve ser considerado no contexto de todo o processo e, de fato, do local como um todo.

As estimativas de economia potencial de energia podem ser calculadas com base nos balanços de energia resultantes de medições. Essas estimativas fornecem uma base para determinar as possíveis economias de energia que podem ser alcançadas por meio da implementação dessas medidas, considerando tanto os benefícios imediatos quanto os custos associados a cada uma delas.

Canan Acar, Ibrahim Dincer e Arun Mujumdar (2020) realizaram uma revisão dos avanços recentes nas tecnologias de secagem, consumo de energia e eficiência, bem como do desempenho econômico de várias tecnologias alternativas de secagem. Essa revisão abrangeu uma ampla gama de tecnologias de secagem, como adsorção mediada, filme fino agitado, eletrotecnologias, sistemas híbridos, impacto, bombas de calor, microondas, aquecimento ôhmico, janela de refratância, tambor rotativo, vapor superaquecido e vácuo. O estudo abordou os avanços e as características específicas de cada tecnologia, avaliando seu potencial para melhorar a eficiência energética e o desempenho econômico nos processos de secagem.

2.5.1 Fontes de energia para secagem

Kudra (2004) destaca a importância de se escolher a fonte de calor mais adequada para cada aplicação, levando em consideração fatores como custos, tipo de material a ser seco, umidade inicial e final desejada, a capacidade, a disponibilidade e o impacto ambiental.

A fonte de calor pode ser fornecida por diversas fontes, como vapor, gás natural, eletricidade, óleo combustível, biomassa, entre outras.

De acordo com Wang (2014), existem três oportunidades principais de economia de energia para as operações de unidades de processamento de alimentos:

- a) Melhorar a eficiência energética das unidades existentes;
- b) Substituir unidades que consomem muita energia por novas unidades mais eficientes; e
- c) Utilizar fontes de energia alternativas.

As energias renováveis podem oferecer custos mais baixos e preços estáveis de energia. Elas podem também gerar oportunidades para o desenvolvimento da indústria local e maiores oportunidades de emprego. As energias renováveis podem aumentar a confiabilidade e a resiliência do sistema de energia e suprimento de energia, incluindo a resiliência aos impactos climáticos das mudanças climáticas (REN21, 2020).

2.5.2 Energia solar

O Brasil dispõe de diversificada matriz energética, possuindo em seu território significativas reservas provadas de petróleo, gás natural, carvão, urânio; e diversificadas fontes de energia renovável, com destaque para o vasto potencial hidrelétrico, eólico, solar e de biomassa de que o País dispõe para geração de energia elétrica (Bandeira, 2012).

O número de aplicações da energia solar é muito abrangente se forem considerados todos os níveis de temperatura e demandas de energia. Essas aplicações vão desde processos agropecuários, passando pela cocção de

alimentos, a dessalinização de água, uma ampla gama de processos industriais e até mesmo a refrigeração e climatização (Pereira *et al.*, 2017).

Um sistema de secagem solar pode assumir diversas configurações e operar em diferentes condições de processamento. Consequentemente, a aplicação da radiação solar nos processos de secagem mostra-se como um método efetivo, barato e seguro para a secagem de alimentos e outros produtos agrícolas (Kumar *et al.*, 2016).

A energia proveniente do sol ($3,8 \times 10^{23}$ kW) é emitida na forma de radiação eletromagnética. E quando parte dessa energia é interceptada pela Terra ($1,08 \times 10^{14}$ kW), os diferentes comprimentos de onda da radiação interagem de forma distinta com os constituintes atmosféricos, sofrendo processos de absorção e espalhamento (Thirugnanasambandam, 2010). A radiação solar sofre influência do ar atmosférico, das nuvens e da poluição antes de chegar ao solo (Villalva, 2012). A disponibilidade e a variabilidade do recurso energético solar estão intrinsecamente associadas às condições de tempo e de clima da região.

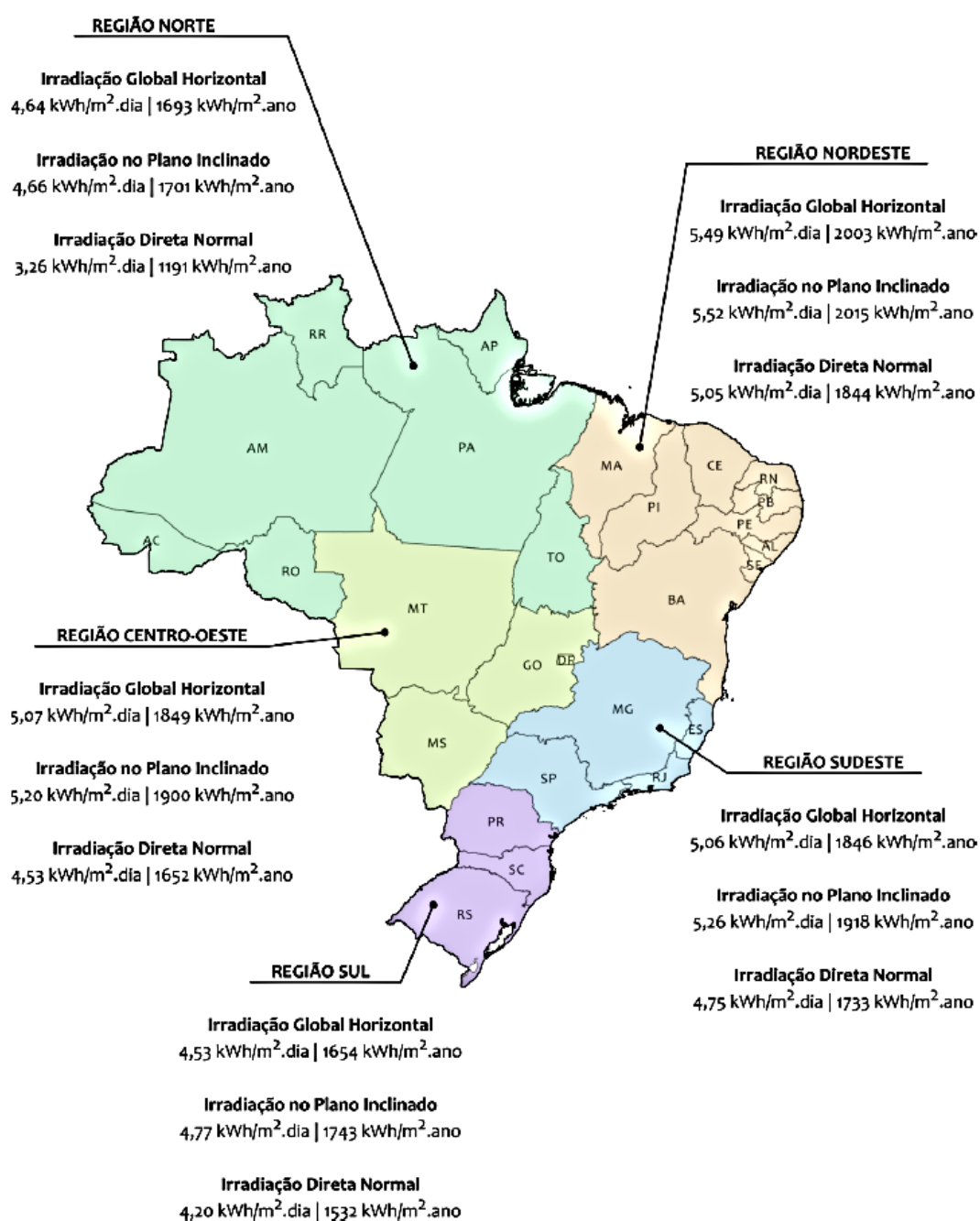
O território brasileiro, devido à sua localização geográfica tropical, é atravessado pela linha do Equador e o Trópico de Capricórnio. Isso resulta em variações mínimas na duração solar do dia, proporcionando uma grande quantidade de luz solar durante o ano.

A região Nordeste apresenta o maior potencial solar, com valor diário média mensal de irradiação global de 5,49 kWh/m²/dia, além de apresentar baixa variabilidade mensal de irradiação. Em seguida, aparecem as regiões Centro-Oeste (5,07 kWh/m²/dia) e Sudeste (5,06 kWh/m² dia). A região Norte apresentou um valor médio de 4,64 kWh/m² dia, relativamente mais baixo que as regiões citadas, devido às características climáticas dessa região, possuindo nebulosidade frequente. A região Sul (4,53 kWh/m²/dia) apresenta características muito parecidas às encontradas em países europeus, como Alemanha, Espanha, Itália, Portugal e França, principalmente no que se refere à variabilidade mensal. Isso acontece, pois, a região Sul encontra-se em uma latitude mais alta em comparação às outras regiões brasileiras, acarretando maiores diferenças na duração do dia em cada estação do ano (Pereira *et al.*, 2017).

As principais vertentes de utilização da radiação solar no Brasil são para o aquecimento de água e para a geração fotovoltaica de energia elétrica (ANEEL, 2008).

O mapa da Figura 8 apresenta os níveis de irradiação solar médio por região brasileira, segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar do Brasil de 2017.

Figura 8 - Níveis de irradiação solar médio por região brasileira.



Fonte: Pereira *et al.* (2017).

2.5.2.1 Aproveitamento Térmico

Entre os vários processos de aproveitamento da energia solar, os coletores solares térmicos têm sido utilizados, há várias décadas, com um custo razoável e confiável para sistema de aquecimento de água em residências e em pontos comerciais (CEMIG, 2015; ANEEL, 2005).

O sistema de aquecimento solar é constituído por placa coletora e reservatório térmico. O coletor solar transforma a radiação solar em calor para aquecer um fluído de trabalho, geralmente água (Tripanagnostopoulos, 2012; El Bassam *et al.*, 2013). Dentro dos coletores, existem tubos por onde circula a água, que é aquecida e depois armazenada em um reservatório térmico (Kalogirou, 2013; Villalva, 2012).

O tipo de coletor solar depende do tipo de aplicação e da temperatura de operação que a aplicação necessita. A faixa de temperatura de operação desses coletores situa-se de 20°C a 95°C (Kratzenberg, 2005).

Coletores solares de alto rendimento podem produzir temperaturas acima de 250°C com excelentes rendimentos (AQSpP, 2004). O calor a estas temperaturas é necessário em vários processos industriais, como produção de vapor, limpeza, lavagem, processo de secagem, cozimento, extração, destilação, pasteurização, outros.

O principal componente de um sistema solar térmico é o coletor solar. Existem diversos tipos de coletores solares que podem ser divididos de acordo com a temperatura de operação: a) coletores de termoplástico sem cobertura (abertos): indicados para piscinas (até 50°C); b) coletores planos fechados: indicados para aquecimento de água abaixo de 80°C; e c) coletores de tubos evacuados: indicados para processos industriais para temperaturas superiores a 80°C (Tripanagnostopoulos, 2012; Rosa, 2012).

Os coletores planos comuns (CPC) apresentam um comportamento fraco para temperaturas superiores a 60°C para as aplicações industriais com temperaturas baixas de processo. Já para temperaturas médias abaixo de 100°, podem utilizar-se de CPCs sem vácuo ou coletores planos com vácuo (CPV). E

para temperaturas acima de 100°C os coletores mais interessantes são os de tubos de vácuo (CTV) e os coletores cilindro-parabólicos (CCP) (AQSpP, 2004).

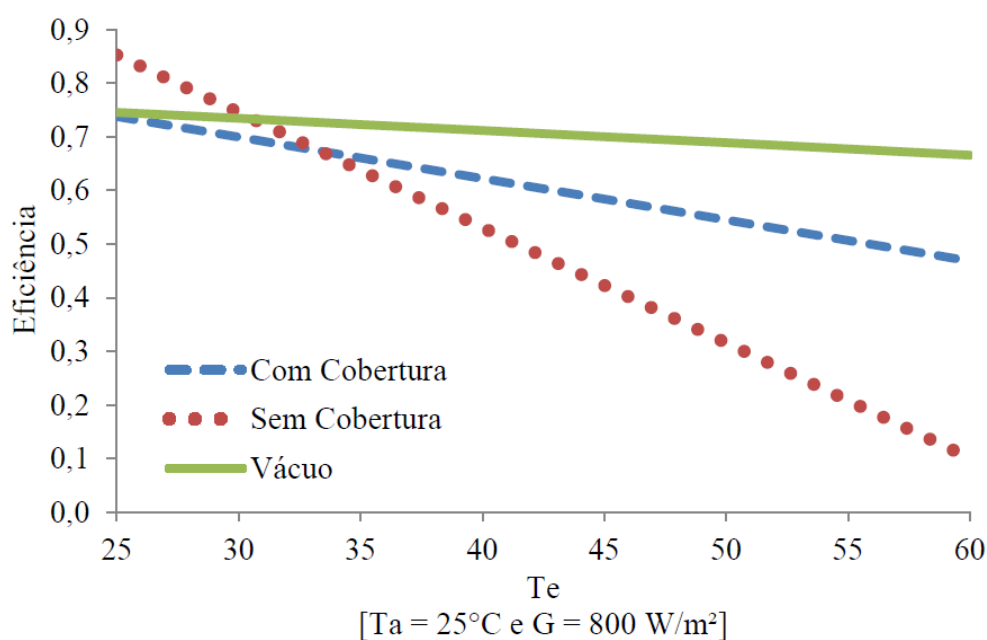
A escolha da tecnologia mais adequada para cada caso depende não apenas da disponibilidade de energia solar, mas também do clima da região (Pereira *et al.*, 2017).

O rendimento de um coletor solar diminui com o aumento da temperatura de funcionamento ou a redução da radiação incidente. A curva de eficiência do coletor está diretamente ligada à área absorvedora (Manea, 2012).

Outro fator importante para o desempenho dos coletores é o ângulo de incidência da radiação solar ao longo do dia. Os coletores solares têm um caráter modular, ou seja, pode-se aumentar a instalação conforme a demanda.

A Figura 9 exibe a curva de eficiência em uma configuração representativa, onde a temperatura ambiente (T_a) é fixada em 25°C, e a irradiância (G) é mantida em 800 W/m² em relação à temperatura de entrada do fluido de trabalho no coletor (T_e , em °C).

Figura 9 - Curva de eficiência com a temperatura ambiente (T_a) fixada em 25°C, a irradiância (G) mantida em 800 W/m² em relação à temperatura de entrada do fluido de trabalho no coletor (T_e , em °C).



Fonte: Rosa (2012).

Os tubos evacuados são dispositivos com dois tubos concêntricos, fechados e selados em uma extremidade. Na outra extremidade, os dois tubos concêntricos têm suas bordas seladas com o próprio vidro de sua construção e o tubo interno aberto para que o fluido possa circular livremente em seu interior. Entre o tubo interno e o externo, é produzido vácuo, o qual é o responsável pelo isolamento térmico do sistema (Avallone, 2017).

Os coletores solares de tubos a vácuo possuem vantagens quanto a perdas térmicas em relação aos coletores planos, pois minimizam as trocas de calor por convecção, condução e radiação devido ao isolamento da sua superfície absorvedora e à baixa emissividade (Morrison, Budihardjo e Behnia, 2004; Rosa, Manea e Krenzinger, 2013). São leves, fáceis de instalar e requerem manutenção mínima, porém os custos de aquisição são mais elevados do que os coletores planos (El Bassam *et al.*, 2013).

Os tubos a vácuo oferecem proteção inerente ao congelamento e superaquecimento e apresentam um aumento de 10% na coleta de energia durante um dia inteiro devido aos efeitos dos ângulos de incidência (Kalogirou, 2013).

O número de coletores depende do tamanho do reservatório térmico e do nível de insolação da região. Um fator importante é a distância das tubulações, pois se o espaço a ser percorrido pela água quente for muito grande, a perda de carga pode prejudicar a circulação do sistema.

No caso dos coletores de tubos evacuados, a circulação geralmente é forçada por bomba, pois não existe diferença de altura entre a entrada e a saída do coletor na montagem padrão (Rosa, 2012).

É recomendada sempre a instalação de um sistema de aquecimento auxiliar, acionado em períodos de baixa intensidade solar devido às condições climáticas, sendo o mais comum o apoio elétrico interno ao reservatório térmico (CEMIG, 2015).

As normas brasileiras a serem observadas são: ABNT NBR 15569:2008 (sistema de aquecimento solar de água em circuito direto); ABNT NBR 15747-1:2009 (sistemas coletores térmicos e seus componentes); e a ABNT NBR

10185:2018 (reservatórios termossolares para líquidos destinados a sistemas de energia solar).

A energia solar térmica apresenta-se como uma solução técnica e econômica, viabilizando a redução do consumo de energia elétrica no setor residencial brasileiro, normalmente usada para o aquecimento de água (Prado *et al.*, 2007; Pereira *et al.*, 2017).

2.5.2.2 Conversão direta da radiação solar em energia elétrica

Os sistemas fotovoltaicos têm a capacidade de converter diretamente a luz solar e gerar corrente elétrica. Essa corrente é coletada e processada por dispositivos controladores e conversores, podendo ser armazenadas em baterias para sistemas isolados (*off grid*), ou utilizadas diretamente em sistemas conectados à rede elétrica (*on grid*).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica podem ser classificados de acordo com a potência instalada, conforme regulamentação da ANEEL (REN ANEEL 1.059/2023):

- a) microgeração distribuída: com potência instalada menor ou igual a 75 kW; e
- b) minigeração distribuída: com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW.

As principais vantagens dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede estão na possibilidade de se produzir eletricidade nos próprios pontos de consumo, em que o cliente pode optar por usar uma parte da energia produzida pelos painéis fotovoltaicos em benefício próprio e injetar o restante na rede elétrica convencional (Ruther e Braun, 2010).

O sistema de energia solar fotovoltaico conectado diretamente à rede elétrica tem como componentes básicos: a) módulos fotovoltaicos; b) inversores; c) caixas de junção e proteção; e d) acessórios.

O módulo fotovoltaico é constituído de um conjunto de células montadas sobre uma estrutura rígida e conectadas eletricamente. As células são responsáveis pela conversão da radiação solar em eletricidade. São capazes de produzir tensão e corrente suficientes para a utilização da energia, ao mesmo tempo em que promovem a proteção das células.

Os módulos comerciais diferem entre si por diversos fatores, como eficiência, forma, tamanho, área, cor, custo de fabricação, entre outros. Os principais módulos são compostos por silício cristalino (c-Si), que se subdivide em silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), representando 85% do mercado, por ser uma tecnologia de melhor eficiência, consolidação e confiança (Pinho e Galdino, 2014).

Existem também as células fotovoltaicas de película fina ou filmes finos. Os materiais semicondutores mais utilizados são o silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe).

Os módulos fotovoltaicos podem atingir de 25 a 30 anos de funcionamento, tendo 80% da sua capacidade produtiva, quando forem produzidos com processos e qualidade controlados (Lacchini, 2017).

O inversor é um dispositivo eletrônico que fornece energia elétrica em corrente alternada (CA), de acordo com o funcionamento da rede de distribuição, a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (CC).

Ao ajusta-se ao ponto de máxima potência (MPP) do arranjo fotovoltaico, o inversor consegue o seu maior rendimento. Os inversores empregados em microgeração e minigeração são monofásicos, com potência de até 5 kW. A partir dessa potência, é mais comum a utilização de inversores com saída trifásica, ou inversores monofásicos em associação trifásica (Villalva, 2012).

A caixa de junção (*stringbox*) serve para acomodar todas as conexões das diversas fileiras dos módulos fotovoltaicos. Para proteção, são instaladas chaves seccionadoras, diodos de desvio, diodo de bloqueio, fusíveis, disjuntores e proteção contra surtos (DPS).

Os acessórios que compõem os sistemas são diversos, entre eles pode-se ter a estrutura de sustentação, o kit de aterramento, quadro de proteção CC e CA, cabos, conectores e medidores bidirecionais.

O custo dos sistemas fotovoltaicos é afetado por muitas variáveis, entre elas, econômicas, políticas e tecnológicas (Lacchini, 2017). Na composição do custo total da instalação de um sistema FV, os módulos fotovoltaicos representam o maior custo (40%), seguidos pelos inversores (19%), projeto e instalação (14%), estrutura metálica de suporte (10%), outros componentes (10%), custos e despesas administrativas (7%) (IDEAL, 2019), porém os preços médios dos sistemas FV vêm apresentando uma redução ao longo dos anos, promovendo um aumento no número de conexões à rede.

O sistema de compensação de energia elétrica implantado no Brasil é o de medida líquida de energia (*net metering*), no qual, a energia ativa, injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída, é cedida por meio de empréstimo gratuito à distribuidora local e, posteriormente, utilizada para compensar o consumo de energia elétrica ativa ou contabilizada como crédito de energia de unidades consumidoras participantes do sistema por um prazo de 60 (sessenta) meses (Resolução normativa ANEEL nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023).

No faturamento da unidade consumidora, deve ser cobrado, no mínimo, o valor referente ao custo de disponibilidade para o consumidor do grupo B, ou da demanda contratada para o consumidor do grupo A, conforme o caso.

A quantidade de energia gerada durante a vida útil dos sistemas resulta da tecnologia utilizada, da qualidade da instalação e da irradiação disponível no local da instalação.

Algumas perdas são fixas e dependem da tecnologia utilizada, outras dependem da qualidade do projeto, como as perdas ôhmicas, eficiência e limitações do inversor; outras dependem de fatores ambientais, como temperatura, irradiação inclinada; e outras são previstas, como, por exemplo, perdas por descasamento, perdas por sujeira e perdas por sombreamento parcial (Lacchini, 2017).

2.5.3 Cálculo da eficiência energética

Dado o caráter dispendioso inerente ao processo, a incorporação de tecnologias surge como uma medida essencial para aumentar a eficiência energética e viabilizar economicamente o custo total do produto.

A avaliação da eficiência energética (η) é de suma importância para o processo de secagem de materiais alimentícios, uma vez que permite determinar a relação entre a energia consumida para efetuar a desidratação e a energia fornecida para viabilizar o procedimento. Essa relação é expressa pela Equação (1), a qual representa o cálculo fundamental de η (Strumillo, Jones e Zylla, 2014):

$$\eta = \frac{E_{necessária}}{E_{fornecida}} \quad (1)$$

O SMER, conhecido como a taxa de extração de umidade específica (*Specific Moisture Extraction Rate*), representa uma abordagem alternativa para a avaliação da eficiência energética de secadores, sendo quantificado em termos de quilogramas de umidade extraída por quilowatt-hora de energia consumida. A equação que descreve o cálculo do SMER pode ser expressa conforme apresentado na Equação (2) (Strumillo, Jones e Zylla, 2014). Essa métrica oferece uma perspectiva mais precisa e direta sobre a eficiência do processo de secagem, proporcionando uma medida quantitativa que permite comparar e analisar diferentes configurações e operações de secadores de forma eficiente e objetiva. A adoção do SMER como uma métrica relevante pode contribuir significativamente para o desenvolvimento e melhoria de secadores, com potencial para promover a eficiência energética e reduzir os impactos ambientais associados à secagem de materiais.

$$\text{SMER} = \frac{\text{Quantidade de água evaporada}}{\text{Energia consumida}} \quad (2)$$

Ao longo das pesquisas, diversos estudiosos têm adotado o consumo médio específico de energia (SER) como uma medida para avaliar o consumo de

energia em diferentes sistemas de secagem, assemelhando-se à abordagem do SMER. O SER é determinado, pela Equação (3), por meio da razão entre o consumo de energia (E_c) e a massa da amostra (m_s) em sua base seca, ou ainda, pela Equação (4) razão entre o consumo de energia e a massa de água (m_w) removida durante o processo de secagem (Strumillo, Jones e Zylka, 2014).

$$SER = \frac{E_c}{m_s} \quad \left(\frac{kWh}{g} \right) \quad (3)$$

$$SER = \frac{E_c}{m_w} \quad \left(\frac{kWh}{g} \right) \quad (4)$$

A adoção dessa métrica proporciona uma análise mais acurada e direcionada do consumo de energia, levando em consideração tanto a quantidade de massa da amostra quanto a de água removida durante o processo de secagem. Esse enfoque contribui para a compreensão aprofundada dos aspectos energéticos dos sistemas de secagem, possibilitando uma avaliação objetiva e eficiente das diferentes configurações e operações de secadores.

O cálculo da eficiência energética permite uma avaliação do desempenho energético do processo de secagem, identificando oportunidades potenciais de aprimoramento. É de suma importância ressaltar que as condições operacionais adotadas e as propriedades intrínsecas dos materiais processados exercem um impacto significativo no desempenho energético de secadores ou de processos de secagem em geral. Portanto, o entendimento das interações entre esses fatores é fundamental para o desenvolvimento de estratégias que promovam a utilização mais eficiente dos recursos energéticos e a melhoria global dos processos de secagem na indústria.

No Quadro 2 são sumarizadas as eficiências energéticas de diversos secadores a vácuo, respectivamente, como compiladas por Menon, Stojceska e Tassou (2020).

Quadro 2 – Resumo da eficiência energética de diferentes secadores a vácuo (VD), micro-ondas (MW) e liofilização (FD).

Tipo de secagem a vácuo	Amostra de secagem	Eficiência Energética
MW + VD	Cultura probiótica	$\eta = 27\%$
VD	Suco de romã	$\eta = 14,9\%$
VD + Aquecimento Ôhmico	-----	$\eta = 24,76 - 42,78\%$
VD	Flores de camomila	$\eta = 1,42 - 6,53\%$
MW + VD	Folhas de Chá	Valores de SEC de 1,90–9,75 kWh/kg
MW + VD	Morangos	Valores de SMER de $1,30 \times 10^{-3} - 2,30 \times 10^{-3}$ kWh/g
VD	Cogumelo	Valores de SMER de 3,36–9,60 kWh/kg
MW + VD	-----	Valores SMER de 41,97–124,34 kWh/kg
FD + VD	Quiabo	Valores SMER de 21,3 kWh/kg
MW + VD	-----	Valores SMER de 4,38 kWh/kg
MW + VD	Cogumelo	Valores SMER de 10,75–21,3 kWh/kg

Fonte: Menon, Stojceska e Tassou (2020).

2.5.4 Considerações sobre avaliação de secadores

A avaliação do desempenho dos secadores pode ser determinada por requisitos de qualidade, características do produto e fatores econômicos.

Conforme Augustus Leon, Kumar, e Bhattacharya (2002) os parâmetros geralmente relatados na avaliação de secadores podem ser classificados da seguinte forma (quando aplicável): a) características físicas do secador: tipo, tamanho, forma, capacidade de secagem, área e número de bandejas, conveniência de carregamento e descarregamento; b) performance térmica do secador: tempo de secagem, curva de secagem, temperatura e umidade relativa do ar; velocidade de fluxo de ar e eficiência do secador; c) qualidade do produto seco: qualidade sensorial (cor, sabor, textura e aroma), atributos nutricionais e capacidade de reidratação; d) viabilidade econômica: custo operacional e retorno do investimento.

O custo desempenha um papel fundamental na decisão da fonte de calor a ser utilizada no processo de secagem. O gasto associado à energia térmica pode variar consideravelmente, dependendo da escolha da fonte de calor e das condições locais, como disponibilidade e custo dos combustíveis. É importante conduzir uma análise de custo-benefício para determinar a fonte de calor mais apropriada para cada aplicação de secagem. Além disso, é importante considerar os custos operacionais e de manutenção ao longo do período de utilização (Kudra, 2004).

Para uma avaliação de uma nova tecnologia de secagem, parâmetros críticos a serem considerados incluem consumo de energia, qualidade do produto, rendimento do processo, vida útil do produto seco e facilidade de uso (Langford *et al.*, 2017; Martins *et al.*, 2020).

Vários indicadores econômicos, como valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR), razão benefício/custo (B / C) e tempo de retorno (*payback*) são usados como ferramentas pelos pesquisadores para validar o desempenho de protótipos de secagem (Menon, Stojceska e Tassou, 2020).

É essencial considerar não só os aspectos técnicos relacionados à implementação de medidas de eficiência energética, mas também os custos e benefícios financeiros associados a elas para que o aprimoramento da eficiência energética seja viável e prático. É por meio da análise desses aspectos que é possível identificar as medidas mais eficazes e rentáveis, que trazem benefícios tanto para o meio ambiente quanto para as empresas e indivíduos que as adotam.

2.5.5 Aspectos ambientais na secagem

Nos últimos anos, o aumento nos custos de energia coincidiu com a introdução de regulamentações mais rigorosas relacionadas à poluição, segurança e condições de trabalho. Governos em todo o mundo têm implementado leis ambientais visando a redução do consumo de energia e das emissões de gases de efeito estufa (GEE) pelas indústrias. Nesse contexto, a próxima geração de secadores e tecnologias de secagem é esperada para impulsionar o desenvolvimento sustentável, com maior eficiência energética e térmica, custos

operacionais mais baixos e aprimoramento da qualidade dos produtos (Menon, Stojceska e Tassou, 2020).

A secagem de materiais pode ter diversos impactos ambientais significativos. Devido ao substancial consumo de combustíveis, a secagem contribui para a emissão de poluentes atmosféricos e, conseqüentemente, os gases de efeito estufa (GEE). Esses impactos podem ser agravados por sistemas de secagem que dependem de fontes de combustível com baixa eficiência, resultando em emissões mais elevadas de poluentes.

Além disso, a secagem pode gerar resíduos, não se limitando apenas a produtos de combustão e calor, mas também incluindo partículas de poeira e vapores não condensáveis. Esses resíduos podem afetar negativamente a qualidade do ar e o ambiente local.

É importante ressaltar que a eletricidade, embora seja considerada uma fonte de energia limpa em seu uso, pode ter implicações ambientais negativas devido aos métodos de geração. Portanto, a eficiência energética deve ser avaliada, considerando os desafios globais relacionados ao aquecimento global e à proteção ambiental.

Outro ponto interessante é que com a implementação do Protocolo de Quioto, surgiu a oportunidade de transformar o carbono em uma moeda de troca, permitindo que países signatários desse acordo comprem e vendam créditos de carbono. Esses créditos são obtidos por meio de acordos internacionais, onde nações com emissões reduzidas de CO₂ podem negociar com países que emitem altos níveis de poluição. Cada vez que uma tonelada de carbono é reduzida, o país responsável pela redução recebe um crédito de carbono como recompensa. A quantidade de créditos de carbono concedida varia de acordo com a magnitude da redução das emissões de CO₂ alcançada. Esse sistema representa uma abordagem importante para incentivar a redução das emissões de gases de efeito estufa a nível global.

Assim, a busca por processos de secagem mais eficientes desempenha um papel importante na minimização dos impactos ambientais indiretos associados aos sistemas de secagem, levando em consideração a diversidade de fontes de energia e as características específicas de cada aplicação de secagem.

3 ESTUDO DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UM SECADOR CICLOS DE AQUECIMENTO-PULSO DE VÁCUO COM AQUECIMENTO DE ÁGUA A PARTIR DE COLETORES SOLARES

3.1 INTRODUÇÃO

O processo de secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV) é reconhecido como uma opção viável para a produção de frutas e vegetais desidratados e crocantes, apresentando alta porosidade e tempos de processamento reduzidos (Roratto, 2021).

Vários estudos têm proposto aplicações do processo em diferentes amostras, alterando-se o tempo, a pressão, a temperatura e realizando análise físico-química, ensaios reológicos e análises sensoriais. Destacando-se as pesquisas realizadas por Link, Tribuzi e Laurindo (2017a, 2017b), Link, *et al.* (2018), Monteiro, Carciofi e Laurindo (2016), Monteiro *et al.* (2018a, 2018b), Andreani (2018), Porciuncula, Segura e Laurindo (2016) e Zotarelli, Porciuncula e Laurindo (2012). Essas investigações contribuem para o desenvolvimento e aperfeiçoamento das aplicações da secagem por CAPV.

No entanto, observa-se uma ausência de estudos relacionados às avaliações de custo de produção, viabilidade econômica e consequências ambientais, aspectos de fundamental importância para fundamentar de maneira técnica tanto aos produtores quanto aos investidores e/ou políticas públicas. Essa lacuna é particularmente acentuada no contexto de novas tecnologias, onde a disponibilidade de dados técnicos é limitada, o que torna desafiadoras as análises e projeções relacionadas a investimentos.

Conforme destacado por Menon, Stojceska e Tassou (2020), o consumo de energia em secadores a vácuo engloba tanto a energia consumida pela bomba de vácuo quanto aquela utilizada para aquecer as bandejas ou prateleiras de secagem.

A energia solar térmica se apresenta como uma solução técnica e economicamente viável, permitindo a redução do consumo de energia elétrica no

setor residencial brasileiro, sobretudo para o aquecimento de água, conforme estudos realizados por Prado *et al.* (2007) e Pereira (2017).

A pesquisa se concentrou na análise do consumo energético, visando aprimorar a eficiência do secador como contribuição científica, social e ambiental. O escopo abrange a análise detalhada das dimensões tecnológicas e econômicas, visando melhorar a eficiência energética de um secador de aquecimento-pulso de vácuo de pequena escala com foco em fontes de energia renovável. Este esforço está alinhado com Menon, Stojceska e Tassou (2020), que destacam a importância de tecnologias de secagem eficientes, viáveis economicamente e sustentáveis ecologicamente, mantendo a qualidade dos produtos desidratados.

Assim, esse capítulo visa realizar uma análise energética de um secador de aquecimento-pulso de vácuo, destacando o aquecimento solar. O enfoque central é identificar o consumo energético e explorar oportunidades para aprimorar a eficiência no processo de secagem. Além disso, busca-se avaliar a viabilidade econômica e analisar os impactos ambientais, mensurando a redução das emissões de carbono equivalente.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1. Preparação das amostras

Adquiridas no comércio local da cidade de Florianópolis, Santa Catarina, as bananas frescas, em penca, da variedade Prata (*Musa Sapientum L.*), foram mantidas à temperatura ambiente até o momento da sua utilização.

Os frutos foram classificados com base na cor da casca (fruta amarela sem presença de manchas pardas) e no teor de sólidos solúveis (TSS) através de um refratômetro óptico com resolução 0,1°Brix (Refratômetro de bolso Atago, Modelo - PAL-BX/RI, Japão).

Após o processo de classificação, as bananas foram submetidas a uma etapa de descascamento manual, seguida pelo processo de corte em fatias de cinco milímetros de espessura, utilizando um cortador de duas lâminas fixas. Durante o procedimento de corte, as extremidades dos frutos foram descartadas a fim de garantir a uniformidade da espessura das fatias.

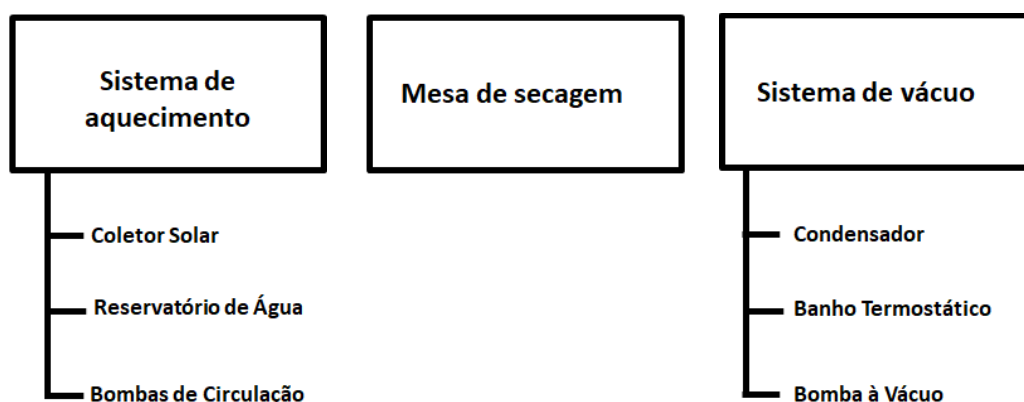
Para a realização do experimento, cerca de 4.000 g de bananas fatiadas foram dispostas sobre folhas antiaderentes de grau alimentício resistentes à alta temperatura (PTFE – Politetrafluoroetileno ou Teflon®), devido à sua baixa aderência e condutividade térmica de 0,24 W/(m.K). Em seguida, as amostras foram transferidas para o interior da câmara de secagem. Termopares foram estrategicamente posicionados em quatro amostras, distribuídas em cada quadrante da câmara de secagem, com o propósito de monitorar a temperatura das bananas ao longo do processo de secagem.

3.2.2. O secador de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo

O secador de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo a ser analisado, foi desenvolvido por Roratto (2019) no Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos (PROFI), localizado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em Florianópolis – SC. Esse equipamento utiliza energia solar térmica acumulada na forma de água quente. Empregando a técnica de secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, o secador utiliza a condução como meio de transferência de calor para produzir bananas desidratadas e crocantes.

O secador por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo a ser analisado consiste em três módulos: sistema de aquecimento, uma mesa de secagem e um sistema de vácuo, conforme ilustrado na Figura 10.

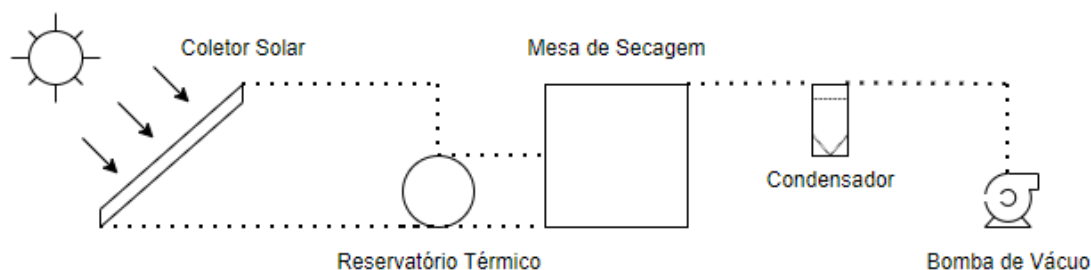
Figura 10 - Diagrama de blocos do secador híbrido.



Fonte: Autor (2020)

O diagrama de montagem do dispositivo experimental do sistema de secagem aquecido por coletores solares é apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Diagrama do dispositivo experimental do sistema de secagem



Fonte: Autor (2022).

A disposição da montagem consiste na integração de um sistema de secagem que utiliza energia solar e elétrica auxiliar. A energia é coletada por meio de coletores solares, aquecendo a água que é armazenada em um reservatório térmico. Um sistema de aquecimento elétrico é ativado durante períodos de baixa insolação. A água aquecida circula sob uma placa de alumínio, fornecendo calor ao sistema. Dispositivos elétricos adicionais são empregados para auxiliar na remoção de umidade e ajustar a pressão do ambiente de secagem. As tampas de vidro são posicionadas sobre borrachas de silicone fixados nas periferias das câmaras de secagem para assegurar uma vedação eficaz.

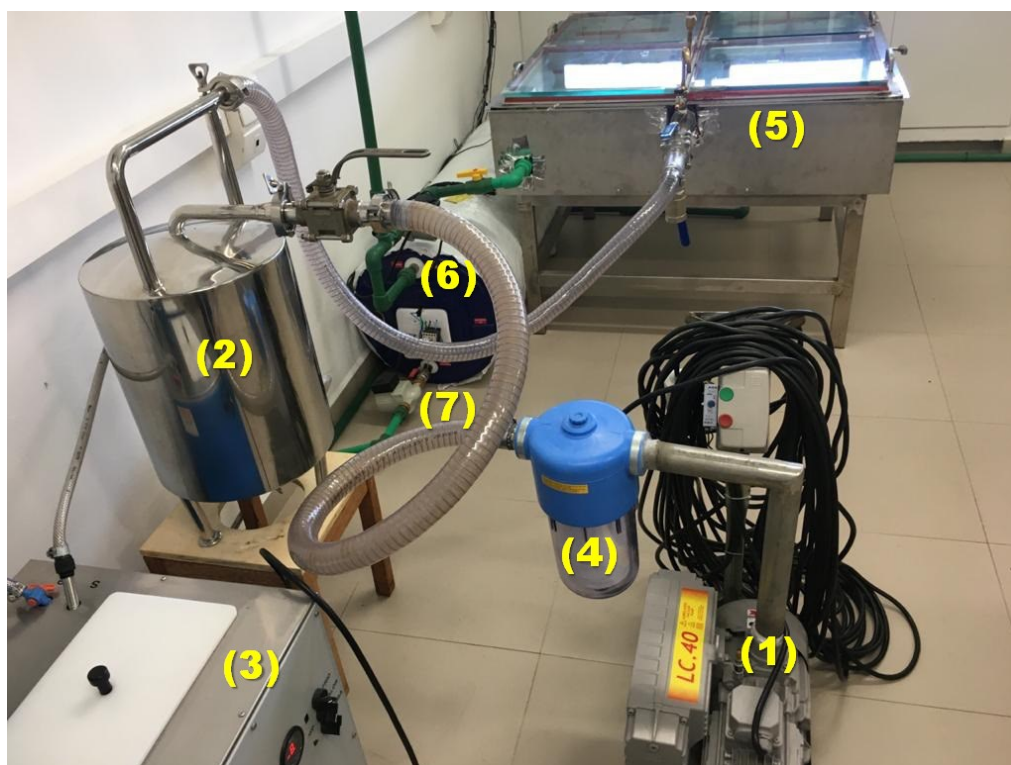
O sistema de aquecimento consiste em dois coletores solares de tubos evacuados (Ecologic, modelo BNP-1-30 tubos, Brasil), com capacidade de produção de 346,15 kWh/mês; um reservatório térmico de água (*boiler*) de 0,3 m³ com apoio elétrico, contendo uma resistência elétrica de 3 kW; um tanque de aço inox com isolamento térmico de 0,2 m³; e três bombas de circulação de água (Inova, modelo GP-100, Brasil).

A mesa de secagem é constituída por quatro câmaras de alumínio de 6,25 L (0,5m x 0,5m x 0,025m) aquecidas em sua base pelo vapor fornecido pela água quente proveniente do sistema de aquecimento. Essas câmaras estão conectadas ao sistema de vácuo e sua parte inferior é apoiada em um tanque de aço inoxidável com isolamento térmico.

O sistema de vácuo é composto por uma bomba de vácuo (DVP, modelo - LC.40, Itália) operando de forma contínua; um condensador utilizado para condensar os vapores gerados e como um reservatório de vácuo para a rápida decompressão das câmaras; um banho termostático (MS980 TMP) contendo solução etilenoglicol a -11°C ; e um filtro coalescente (DVP, modelo FSC.100, Itália) para remover possíveis materiais e proteger a bomba de vácuo.

A Figura 12 ilustra os principais componentes do secador híbrido empregado neste projeto, incluindo: (1) bomba de vácuo; (2) condensador; (3) banho termostático; (4) filtro coalescente; (5) mesa de secagem; (6) reservatório térmico de água; e (7) bombas de circulação de água.

Figura 12 - Principais componentes do secador híbrido desenvolvido: (1) bomba de vácuo; (2) condensador; (3) banho termostático; (4) filtro coalescente; (5) mesa de secagem; (6) reservatório térmico de água; e (7) bombas de circulação de água.



Fonte: Autor (2019)

3.2.3. Análise energética

Para a realização da análise energética realizou-se um levantamento detalhado do sistema de secagem, incluindo os equipamentos, processos, fontes de energia e padrões de consumo.

Os dados coletados englobaram o consumo de energia elétrica em diferentes períodos, a potência dos equipamentos e as horas de funcionamento. Para a medição do consumo de energia elétrica da bomba de vácuo trifásica utilizou-se um medidor digital de energia polifásico (NANSEN, modelo Vector 3, Brasil), na saída trifásica, durante todo o processo produtivo. Os demais componentes elétricos foram avaliados com dois medidores multifuncionais monofásicos. Esses dispositivos permitiram verificar a tensão, corrente, potência instantânea e energia elétrica consumida. Os pontos de coleta abrangeram o banho termostático, a resistência do reservatório de água quente e as bombas de circulação. A coleta de dados ocorreu durante todo o processo, com os valores calculados a partir das médias dos consumos obtidos.

3.2.3.1 *Pressupostos*

Com o objetivo de realizar uma análise quantitativa dos balanços de massa, energia e perdas energéticas durante o processo de secagem utilizando a técnica de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo com aquecimento através de coletores solares, foram adotadas as seguintes suposições simplificadoras:

- a) O modelo adotado baseia-se na premissa de um sistema em estado estacionário, em que as condições operacionais permanecem constantes ao longo do tempo e as propriedades do material não variam durante o processo de secagem;
- b) Supõe-se que não há transferência de calor ou massa através das paredes das câmaras de secagem, e os efeitos do ambiente externo são desprezados, focando exclusivamente nas interações internas do sistema;
- c) Todos os componentes do sistema são tratados como adiabáticos, implicando a ausência de trocas de calor com o ambiente externo.

- d) Perdas de carga e vazamentos de vapor no equipamento foram desconsiderados, supondo-se uma operação idealizada e livre de dissipações energéticas indesejadas.
- e) As perdas por condução, convecção e radiação são consideradas insignificantes no contexto do processo de secagem aquecimento-pulso de vácuo;
- f) As variações de energia potencial e cinética do fluido de trabalho ao longo do processo foram desprezadas, de modo a simplificar a análise energética.
- g) Assume-se que o estado termodinâmico do fluido de trabalho na saída de um determinado equipamento é igual ao estado de entrada do equipamento subsequente, considerando um fluxo contínuo e uniforme.
- h) A energia térmica disponível no sistema é considerada suficiente para atender plenamente às demandas de calor necessárias para a evaporação da água contida no material; e
- i) Desprezou-se quaisquer efeitos de mistura ou reações químicas que possam afetar significativamente a eficiência energética durante o processo.

No Quadro 3 são expostos os principais parâmetros e condições consideradas neste estudo. Esses parâmetros são fundamentais para a análise e avaliação da eficiência energética do sistema de secagem empregando a técnica de aquecimento-pulso de vácuo. Cada um deles desempenha um papel importante na determinação do consumo de energia, na eficiência do processo e na qualidade final do produto.

Quadro 3 - Os principais parâmetros considerados neste estudo.

Temperatura inicial - T_i	25 °C
Temperatura final - T_f	90 °C
Temperatura desejada na banana – T_b	70 °C
Pressão inicial	1 atm
Pressão de trabalho	40 mbar
Pressão de vapor	0,04 bar abs
Temperatura do vapor saturado	28,96 °C
Calor latente do vapor	2.432,31 kJ/kg
Entalpia específica do vapor saturado	2.553,71 kJ/kg
Entalpia específica do vapor superaquecido	121,404 kJ/kg
Volume específico do vapor saturado	34,79 m ³ /kg

Volume específico da água saturada	0,0010041 m ³ /kg
Volume de água total do sistema	500 l
Volume de água do reservatório térmico	300 l
Volume de água da mesa de secagem	200 l
Calor específico da água (c _p)	4,186 kJ/kg°C
Massa específica da água (ρ)	1.000 kg/m ³
Calor específico da banana (c _p) (Mu=75%)	C _p = 3.346 J/kg°C
Condutividade térmica da banana (Mu=75%)	k = 0,481 W/(m°C)
Massa específica da banana (ρ)	980 kg/m ³
Latitude (Florianópolis)	27,599648° S
Longitude (Florianópolis)	48,518342° O
Irradiação solar diária (potencial)	4,25 kWh/m ²
Irradiação solar diária (período de teste)	3,68 kWh/m ²
Eficiência energética do coletor solar	70,9%
Área de cada módulo do coletor solar de tubos evacuados (Ecologic, BNP-1-30 tubos)	4,473 m ²
Fator de correção para inclinação e orientação do coletor solar (FC _{Instal})	1,06
Coefficiente de ganho do coletor solar (Fr _{τα})	0,768
Coefficiente de perdas do coletor solar (Fr _{UL})	4,8
Resistência elétrica do aquecimento auxiliar	3 kW
1 atm	1013,25 mbar
1 mbar	100 Pa

Fonte: Autor (2022).

3.2.3.2 *Balço de massa e energia*

O balanço de massa foi aplicado no secador que opera por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo. O balanço de massa total é dado pela Equação (5).

$$M_{fruta} = M_{produto\ seco} + M_{vapor} \quad (5)$$

A quantidade total de água evaporada durante o resfriamento a vácuo de um produto alimentar pode ser calculada usando a Equação (6) proposta por Rennie, Raghavan, Vigneault e Gariepy (1999) e Zotarelli *et al.* (2012).

$$\Delta m_w = \frac{c_p m_p \Delta T}{\Delta H_v} \quad (6)$$

onde:

Δm_w é a massa de água perdida (kg);

c_p é o calor específico médio do produto no intervalo de temperaturas de trabalho (J/kg °C);

m_p é a massa inicial do produto (kg);

ΔT é a diferença de temperatura (°C); e

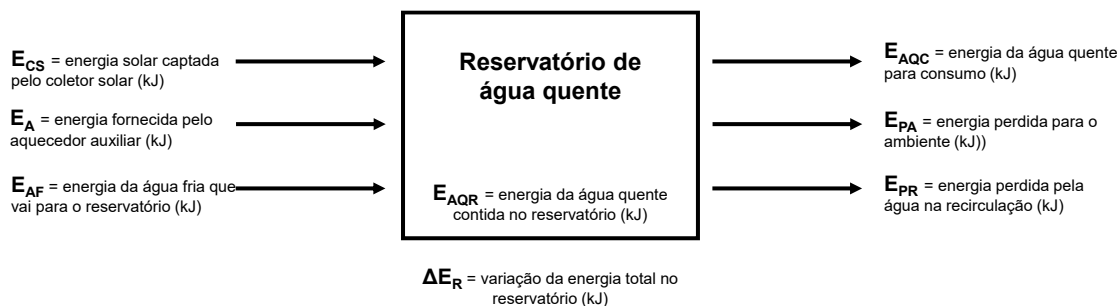
ΔH_v é a entalpia específica de vaporização na pressão final de trabalho (J/kg).

O balanço de energia foi realizado considerando um sistema fechado, operando em batelada, na câmara de secagem. Adotou-se como premissa que não há ocorrência de vazamentos ou infiltrações no sistema em análise, e que o acúmulo de calor no material a ser submetido ao processo de secagem é insignificante devido à sua espessura. Dessa forma, essas considerações foram feitas visando simplificar o modelo de análise e permitir uma abordagem mais clara e direta das trocas térmicas envolvidas.

O balanço térmico no reservatório de água quente pode ser alcançado de acordo com o esquema ilustrado na Figura 13, para um determinado intervalo de tempo Δt , e pode ser expresso pela Equação (7) (ARRUDA, 2004):

$$\sum E_{entrada} = \sum E_{saída} \quad (7)$$

Figura 13 - Fluxo de energia em um reservatório de água quente



Fonte: Adaptado de Arruda (2004).

A Equação (8) descreve a variação da energia total no reservatório:

$$\Delta E_R = E_{AQR} + E_{CS} + E_A - E_{AF} - E_{AQC} - E_{PA} - E_{PR} \quad (8)$$

onde:

- ΔE_R é a variação da energia total no reservatório (kJ)
 E_{AQR} é a energia da água quente contida no reservatório (kJ)
 E_{CS} é a energia solar captada pelo coletor solar e fornecida ao reservatório (kJ)
 E_A é a energia fornecida pelo aquecedor auxiliar (kJ)
 E_{AF} é a energia da água fria que reabastece o reservatório (kJ)
 E_{AQC} é a energia da água quente para consumo (kJ)
 E_{PA} é a energia perdida para o ambiente (kJ)
 E_{PR} é a energia perdida pela água na recirculação (kJ)

Assim:

$$E_{CS} = \eta \cdot A_c \cdot RSI \quad (9)$$

$$E_A = \eta_{Re} \cdot P_e \cdot \Delta t \quad (10)$$

$$E_{AF} = m_{AF} \cdot C_p \cdot T_{AF} \quad (11)$$

$$E_{AQC} = \dot{m}_{AQC} \cdot C_p \cdot T_{AQC} \cdot \Delta t \quad (12)$$

$$E_{PA} = U_R \cdot (\overline{TR} - T_{ar}) \cdot \Delta t \quad (13)$$

$$E_{PR} = \dot{m}_c \cdot C_p \cdot (TR_e - TR_s) \cdot \Delta t \quad (14)$$

onde:

- η é o rendimento do coletor solar
 A_c é a Área absorvedora do coletor solar (m²)
 RSI é a radiação solar incidente (W/m²)
 η_{Re} é o rendimento da resistência elétrica (fonte auxiliar)
 P_e é a potência da resistência elétrica (W)
 C_p é o calor específico da água a pressão constante (kJ/kg°C)
 U_R é o coeficiente global de transferência de calor do reservatório (W/°C)
 m_{AF} é a massa de água fria que entra no reservatório no intervalo Δt (kg)
 \dot{m}_{AQC} é a vazão em massa de água quente que sai do reservatório no intervalo Δt (kg)

\dot{m}_c é a vazão em massa que passa pelo coletor (kg/s)

T_{AF} é a temperatura da água fria que abastece os reservatórios (°C)

T_{AQC} é a temperatura da água quente que sai do reservatório (°C);

$\overline{T_R}$ é a temperatura média da água do reservatório (°C).

T_{Re} é a temperatura média da água na entrada do reservatório (°C).

T_{Rs} é a temperatura média da água na saída do reservatório (°C).

T_{ar} é a temperatura média do ar entre os dois instantes (°C).

Δt é o intervalo de tempo em segundos (s).

A energia útil, conforme descrito na NBR 15569 (2008), representa a energia efetivamente aproveitada no processo, convertendo a energia solar disponível em energia térmica capaz de elevar a temperatura do fluido de trabalho. Neste contexto, a Equação (15) foi empregada para determinar a quantidade de calor absorvida pelo corpo durante o processo.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (15)$$

onde:

Q é a quantidade de calor recebida ou cedida pelo corpo (kJ).

m é a massa (kg).

c_p é o calor específico da água igual a 4,186 kJ/kg°C

ΔT é a variação de temperatura sofrida pelo corpo (°C).

Assim, a energia necessária para aquecer as fatias de bananas desde T_1 até a temperatura média de secagem, $T_2=T_M$, é dada pela Equação (16).

$$\text{Energia para aquecer a fruta (J)} = (M_a + M_s) \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (16)$$

onde:

M_a é massa de água na fruta (g)

M_s é massa total de sólidos no alimento (g)

A energia total para evaporar um quilograma de água do alimento é dada pela soma da energia de aquecimento do material (calor sensível), somada à energia de mudança de fase (evaporação). Assim, a Equação (17) que representa o cálculo da energia total para evaporar cada quilograma de água do produto é dada por:

$$E_{total} = (Ma + Ms).c_p.\Delta T + (Ma + Ms).\lambda \quad (17)$$

onde λ é a entalpia de mudança de fase da água (calor latente de vaporização).

A Equação (18) apresenta o cálculo da perda de energia como a diferença entre a energia fornecida para o sistema e a energia útil utilizada para a secagem.

$$E_{perda} = E_{fornecida} - E_{útil} \quad (18)$$

3.2.3.2 *Dimensionamento do sistema de aquecimento solar*

O dimensionamento do sistema de aquecimento solar (SAS) é frequentemente realizado com base na metodologia f-Chart, desenvolvida por Klein et al. nos anos 1976 e 1977, e posteriormente por Beckman et al. em 1977. Além disso, é importante mencionar que o dimensionamento pode também considerar informações simplificadas encontradas em manuais de fabricantes e na Norma ABNT NBR 15569, que estabelece requisitos para o SAS, abrangendo aspectos de concepção, dimensionamento, arranjo hidráulico, instalação e manutenção, com o fluido de transporte geralmente sendo a água. O método de cálculo considera uma fração solar de 70%, a inexistência de sombreamento sobre os coletores solares e estimativas de perdas térmicas correspondentes a 15% da energia útil.

3.2.3.3 Cálculo da taxa de transferência de calor para aquecer a banana por condução em regime estacionário

Ao aquecer um material, haverá um regime transiente inicial em que a temperatura do material está aumentando até atingir um equilíbrio térmico com a fonte de calor, resultando em um regime estacionário.

Uma aproximação possível para estimar o tempo de aquecimento das fatias é considerar que as perdas de calor pelas suas superfícies laterais e superiores são desprezíveis quando comparadas com a transferência de calor para sua face inferior. Nessa situação, Theodore L. Bergman *et al.* (2014) demonstra que se pode usar a Equação (19).

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\zeta_n^2 Fo) \cos(\zeta_n x^*) \quad (19)$$

na qual:

Fo é o número de Fourier que é uma grandeza adimensional usado para descrever a relação entre a taxa de difusão térmica (dada pela difusividade térmica α) e a taxa de transferência de calor (dada pela condutividade térmica k).

A Equação para o cálculo do número de Fourier (Fo) é dada por:

$$Fo = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (20)$$

onde:

α é a difusividade térmica (m^2/s),

t é o tempo (s),

L é o comprimento característico (m).

O coeficiente C_n é:

$$C_n = \frac{4 \operatorname{sen} \zeta_n}{2\zeta_n + \operatorname{sen}(2\zeta_n)} \quad (21)$$

e os valores discretos (autovalores) de ζ_n são raízes positivas da equação transcendental

$$\zeta_n \tan \zeta_n = Bi \quad (22)$$

O número de Biot é usado para definir o método a ser utilizado na solução de problemas de transferência de calor transiente.

Se $Bi > 0,1$; usa-se as cartas de temperatura transiente

Se $Bi < 0,1$; usa-se a análise.

O número de Biot (Bi) é definido como:

$$Bi = \frac{hL_c}{k} \quad (23)$$

onde:

h é o coeficiente convectivo de transferência de calor;

L_c é o comprimento característico (o volume do corpo dividido pela área da superfície do corpo, $L_c = V/A$); e

k é o coeficiente condutivo de calor do corpo.

Para valores de $Fo > 0,2$, a solução pode ser aproximada pelo primeiro termo da série, $n=1$. Assim, a forma adimensional da distribuição de temperaturas se transforma em:

$$\theta^* = C_1 \exp(-\zeta_n^2 Fo) \cos(\zeta_n x^*) \quad (24)$$

ou

$$\theta^* = \theta_0^* \cos(\zeta_n x^*) \quad (25)$$

Na qual $\theta_0^* \equiv (T_0 - T_\infty)/(T_i - T_\infty)$ representa a temperatura adimensional no plano central ($x^*=0$).

$$\theta_0^* = C_1 \exp(\zeta_n F_0) \quad (26)$$

Os coeficientes C_1 e ζ_1 usados na aproximação pelo primeiro termo para as soluções em série na condução transiente unidimensional são fornecidos para uma faixa de números de Biot (Theodore L. Bergman *et al.*, 2014).

A partir das considerações realizadas, pode-se assumir que o número de Biot é muito grande, assumindo valores de ζ_n e C_1 igual a 1,5708 e 1,2733, respectivamente.

3.2.4. Análise da viabilidade econômica do processo

Para analisar a viabilidade econômica, elaborou-se fluxos de caixa abrangendo um período de 10 anos. Com base no fluxo de caixa, considerando uma vida útil de dez anos e uma taxa mínima de atratividade de 11,10% (com base no Tesouro Direto Prefixado 2033), calcularam-se diversos indicadores econômicos para facilitar a análise financeira do empreendimento, tais como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Indicador Benefício/Custo (IBC) e o período de retorno do investimento (*payback*).

A fórmula de cálculo do VPL é apresentada na Equação (27)(27).

$$VPL = FC_0 + \frac{FC_1}{(1+k)} + \frac{FC_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+k)^n} = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} \quad (27)$$

onde,

VPL é o valor presente líquido do projeto;

FC_t é o fluxo de caixa líquido esperado para o período “t”;

n é o número de períodos a que se refere o fluxo de caixa;

k é a taxa mínima de atratividade fornecida pelo mercado financeiro ou custo de oportunidade do capital a investir.

O método da TIR envolve o cálculo da taxa de juros que iguala o valor presente dos fluxos de caixa das alternativas, como indicado na Equação (28).

$$VPL = 0 = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} \quad (28)$$

onde,

VPL é o valor presente líquido do projeto;

FC_t é o fluxo de caixa líquido esperado para o período “t”;

n é o número de períodos a que se refere o fluxo de caixa;

k é a taxa interna de retorno (TIR)

O indicador Benefício/Custo (B/C) é uma métrica que avalia a lucratividade relativa de um projeto, conforme explicado por Shinoda (2008). Ele é calculado como a relação entre o somatório dos valores presentes dos benefícios e o somatório dos valores presentes dos custos, ver Equação (29)(29).

$$IBC = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+k)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+k)^t}} \quad (29)$$

onde,

IBC é a razão benefício/custo atualizado à taxa mínima de atratividade (k);

k é a taxa mínima de atratividade fornecida pelo mercado financeiro, ou custo de oportunidade do capital a investir.

B_t é o fluxo de entrada de caixa no período “t”;

C_t é o fluxo de saída de caixa no período “t”; e

n é a vida útil, vida produtiva analisada.

O *payback* é o tempo necessário para que o investimento total do capital seja equilibrado pelo lucro líquido anual acumulado. Conforme sugerem Weston e Brigham (2000), o *payback* pode ser calculado conforme Equação (30).

$$\text{Payback} = \text{Número do ano antes da recuperação plena} + \frac{\text{Custo não coberto no início do ano}}{\text{Fluxo de caixa durante o ano}} \quad (30)$$

A utilização do dólar como referência é justificada por sua estabilidade e comprovada resistência à inflação. Ao adotar o dólar como padrão, contribui-se para uma comparação mais precisa e objetiva dos indicadores econômicos, fomentando a transparência e facilitando a compreensão das dinâmicas econômicas globais. Essa escolha visa evitar a perda da referência do valor devido à influência da inflação, minimizando distorções, proporcionando uma base sólida e confiável para análises econômicas ao longo do tempo. A taxa de câmbio média utilizada para auxiliar nos cálculos foi de R\$ 4,95/US\$ em junho de 2023.

Os custos referem-se aos gastos associados à produção de produtos desidratados, incluindo matéria-prima, embalagem, consumo de energia pelo equipamento do processo de secagem e mão-de-obra direta.

Os custos médios dos últimos 12 meses da matéria-prima foram definidos através de pesquisa em sites de centro de abastecimento, como <https://www.ceasa.sc.gov.br/index.php/cotacao-de-precos> e <https://www.ceasa-ce.com.br/>. Já os custos das embalagens foram praticados uma média com os valores adquiridos de três empresas de embalagens metalizadas para alimentos.

Para a estimativa dos custos com a mão-de-obra direta, o valor aproximado é de US\$ 3.550,00 /ano para um colaborador, considerando um salário-mínimo de US\$ 266,67 /mês (R\$ 1.320,00 em 2023) mais gratificações.

Para o custo da energia, utilizou-se uma tarifa média de fornecimento acima de 221 kWh, homologada pela ANEEL N° 3.185, de 2023, com um valor médio de US\$ 0,15 /kWh.

Uma pesquisa conduzida pela Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (ABRAMAN) revelou que, em média, os gastos com manutenção correspondem a aproximadamente 5% do faturamento bruto total de uma indústria.

Os custos associados ao equipamento, incluindo o custo total de instalação, custos de manutenção, cálculo da depreciação e estimativa de sua vida útil foi praticado baseado no preço do mercado local em 2023.

3.2.5. Quantificação da geração de carbono equivalente

Para avaliar o impacto ambiental da proposta de um secador que utiliza ciclos de aquecimento-pulso de vácuo com aquecimento da água proveniente de coletores solares, foram utilizadas duas calculadoras online gratuitas. A primeira, disponibilizada pela *Carbon Footprint* e disponível em <https://www.carbonfootprint.com/calculator.aspx>, empregou a metodologia da pegada de carbono. Essa abordagem converte todas as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em equivalentes de carbono e avalia os impactos ambientais associados ao ciclo de vida de um produto, processo ou serviço.

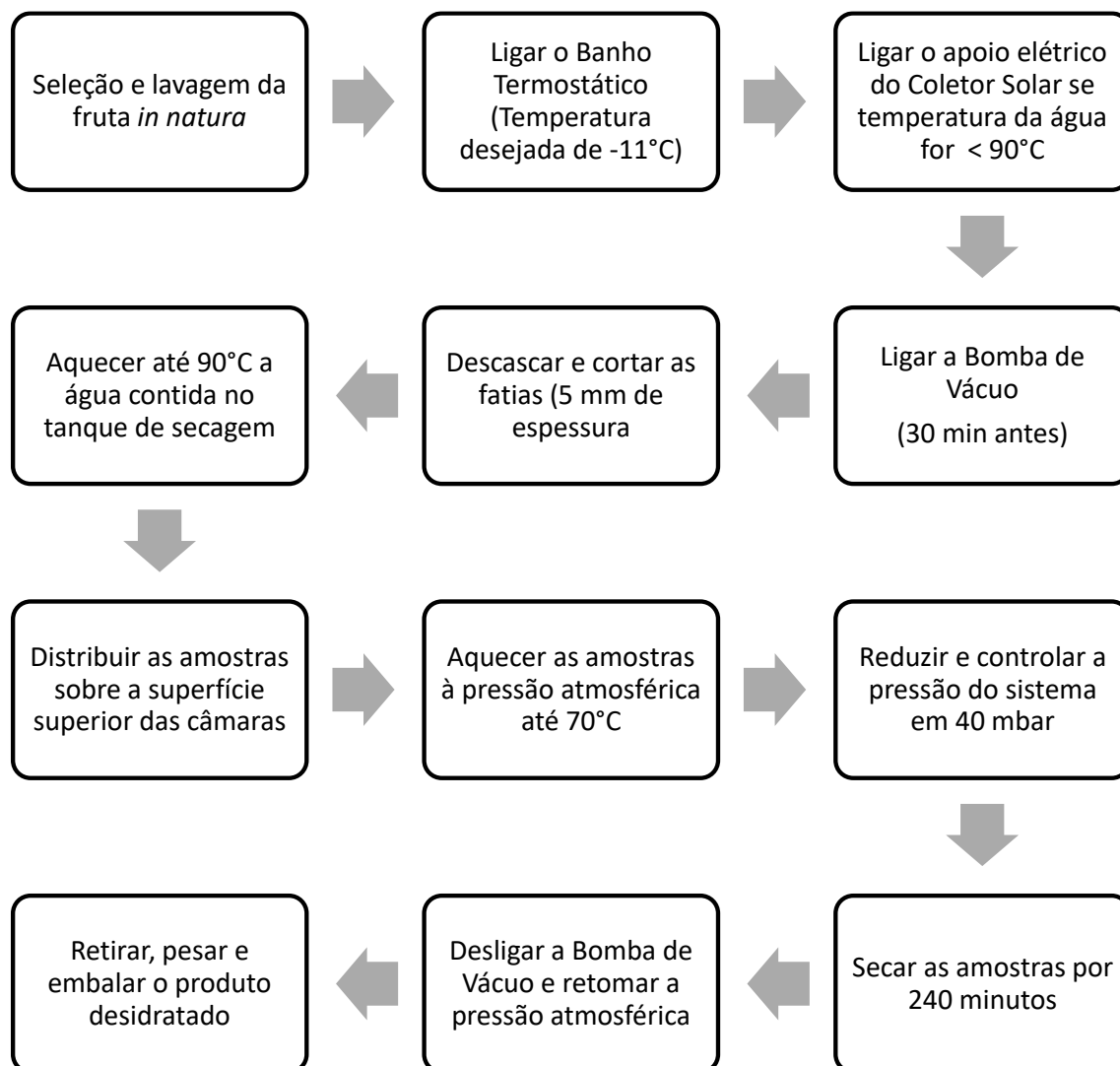
A segunda calculadora, disponibilizada pelo Programa Carbono Neutro Idesam (PCN) e acessível em <https://idesam.org/calculadora/>, foi usada para fins de comparação. Essa ferramenta foi desenvolvida de acordo com as diretrizes do GHG Protocol e incorporou dados e fatores de emissão fornecidos por diversas entidades, como o Ministério de Ciência e Tecnologia e Inovações (MCTI), CETESB, Eletrobrás e IPCC.

Ambas as calculadoras foram empregadas para quantificar as emissões de GEE associadas à operação do secador proposto, considerando um fator de conversão da eletricidade brasileira. Os resultados obtidos permitiram avaliar o impacto ambiental da nova tecnologia em termos de emissões de carbono.

3.2.6. Metodologia de secagem

Para a operação de secagem da banana, foi adotada a metodologia proposta por Roratto (2019). O fluxograma de processamento das frutas no secador híbrido é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma de processamento das frutas no secador híbrido.



Fonte: Autor (2020).

Quando a irradiação solar foi suficiente, a água do secador foi aquecida até 90°C, utilizando os coletores solares, enquanto a resistência elétrica foi configurada para corrigir a temperatura até 94 °C.

As amostras fatiadas são colocadas sobre a superfície superior das câmaras de secagem e aquecidas à pressão atmosférica para atingirem a temperatura desejada. Simultaneamente, a bomba de vácuo é acionada para aplicar vácuo no condensador. Quando as fatias de banana atingem 70 °C, uma válvula esférica posicionada entre as câmaras de secagem e o condensador é aberta, permitindo que as câmaras sejam rapidamente descomprimadas até alcançar a pressão final de 40 mbar.

A bomba de vácuo opera ininterruptamente, tendo o seu ciclo de trabalho iniciado cerca de 30 minutos antes conforme orientação no manual de operação e manutenção do fabricante (DVP, modelo - LC.40, Itália). Um condensador e um capturador de sílica evitam que vapores do processo de secagem alcancem a bomba, direcionando-os através do sistema.

Seguindo a metodologia de Roratto (2019), aplicou-se a secagem sob vácuo durante todo o processo, com uma duração total de 240 minutos. Ao final desse período, a bomba de vácuo é desligada, e a pressão atmosférica é reestabelecida por meio da abertura de uma válvula. O produto desidratado é então retirado da câmara de secagem, pesado e embalado.

3.2.7. Caracterização do produto desidratado

Para a caracterização da umidade das amostras, empregou-se o método gravimétrico, conforme descrito na AOAC (2005). As pesagens foram realizadas utilizando-se uma balança analítica (Shimadzu, Modelo - AY220, Filipinas), enquanto a secagem das amostras ocorreu em uma estufa a vácuo (TECNAL TE-395, Brasil) a 70 °C. As análises foram conduzidas em triplicata, tanto antes quanto após o processo de desidratação.

A atividade de água foi determinada utilizando um higrômetro digital (Aqualab Modelo - Série 3 TE, DecagonDevices, Inc., Pullman, EUA), por meio da medida do ponto de orvalho a 25 °C. Também foram realizadas análises em triplicata antes e após a desidratação.

Foram analisadas a quantidade resultante de produto em cada batelada através de uma balança digital com precisão de 0,01g.

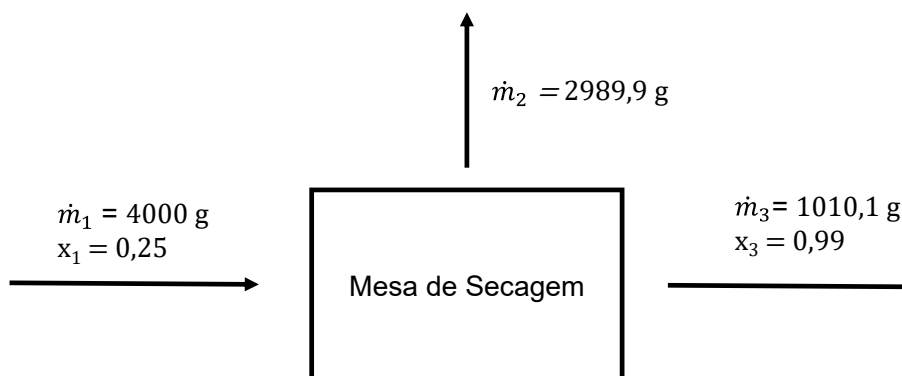
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Balanço de massa

O resultado indicou um teor de umidade final médio de $0,01 \pm 0,005$ g de água/g de sólidos secos. É pertinente destacar que a vazão mássica de sólidos secos permanece constante, mantendo-se inalterada tanto no início quanto no

término do processo. Com base nessas considerações, procedeu-se à elaboração do balanço de massa correspondente a essa operação, cuja representação visual e explanação estão delineadas na Figura 15.

Figura 15 – Balanço de massa na etapa de secagem



Fonte: Autor (2023).

onde,

\dot{m}_1 é a vazão mássica da banana *in natura*;

\dot{m}_2 é a vazão mássica da água evaporada;

\dot{m}_3 é a vazão mássica de banana desidratada;

x_1 é a fração mássica de sólidos na banana *in natura*;

x_3 é a fração mássica de sólidos na banana desidratada.

Mediante a introdução de 4.000 g de banana em sua forma natural, despojada de casca e em fatias, para o processo de desidratação de banana com teor de umidade inicial de 75% para uma umidade final de 1%, é possível obter ao final do ciclo de operação por meio da aplicação do método de secagem ciclos de aquecimento-pulso de vácuo um rendimento de 1.010,1 g de banana desidratada por batelada. Têm-se, portanto, uma massa de água evaporada é igual a 2.989,9 g.

3.3.2. Balanço de energia

3.3.2.1 Demanda energética do sistema de aquecimento da água

A temperatura desejada para o aquecimento da água no sistema térmico é estabelecida em 90 °C, com o propósito de elevar a temperatura da face inferior das câmaras de secagem, as quais se encontram inicialmente a uma temperatura ambiente de 25 °C. Para calcular a demanda de energia do sistema de aquecimento, foi aplicada Equação (15).

$$Q_{aquecer} = 0,5 \text{ m}^3 * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (90 - 25) ^\circ\text{C} = 136.045 \text{ kJ} \quad (31)$$

Portanto, considerando o calor específico da água igual a 4,186 kJ /kg°C, a energia necessária para elevar a temperatura da água do sistema de aquecimento de 25 °C (temperatura ambiente inicial) para 90 °C (temperatura final) foi calculada como 54.418 kJ (ou 15,12 kWh) para 0,2 m³ de água da câmara de secagem e 81.627 kJ (ou 22,67 kWh) para 0,3 m³ de água do reservatório térmico, totalizando um gasto energético de 136.045 kJ (ou 37,79 kWh) para o sistema com 0,5 m³ de água.

3.3.2.2 Quantidade de calor necessário para evaporar a água da fruta

O calor removido durante o processo de secagem pode ser determinado como o produto da quantidade de água vaporizada pelo calor latente de vaporização. Nesse sentido, utilizando a Equação ((6(6), tem-se:

$$Q_{evaporar} = m_2 * \lambda_2 = (2,99 \text{ kg}) * \left(2.472 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) = 7.391,28 \text{ kJ} \quad (32)$$

Portanto, a quantidade de calor necessário para evaporar a água da fruta, ou seja, o calor removido durante o processo de secagem é de 7.392,28 kJ ou 2,05 kWh, considerando um calor latente de vaporização de $\lambda_2 = 2.472 \text{ kJ.kg}^{-1}$ e uma massa de água vaporizada de $m_2 = 2,99 \text{ kg}$.

3.3.2.3 Cálculo da taxa de transferência de calor para aquecer a banana por condução em regime estacionário

Com a condição de fluxo de calor desprezível nas faces das fatias de banana que não estão em contato com a placa quente, o comprimento característico da fatia de banana é igual à sua espessura, 0,005 m (5 mm).

A partir das propriedades termofísicas da banana, $k = 0,481 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$, $\rho = 980 \text{ kg/m}^3$ e $c_p = 3,346 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$, calcula-se a sua difusividade térmica (α):

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} = \frac{0,481 \frac{\text{J}}{\text{s m}^\circ\text{C}}}{980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} 3346 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}}} = 1,47 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (33)$$

Assim, calcula-se o número de Fourier:

$$Fo = \frac{\alpha t}{L^2} = \frac{(1,47 \times 10^{-7}) t}{0,005^2} = 5,88 \times 10^{-3} t \quad (34)$$

A diferença de temperatura adimensional é igual a:

$$\theta_0^* \equiv \frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \frac{70 - 90}{25 - 90} = 0,308 \quad (35)$$

Assim,

$$\theta_0^* = 1,2733 \exp (1,5708 \times 5,88 \times 10^{-3} t) = 0,308 \quad (36)$$

$$0,2419 = \exp (-9,2 \times 10^{-3} t)$$

$$t = 154 \text{ s}$$

Dessa forma, o tempo para que a superfície superior atinja a temperatura de 70 °C é aproximadamente 154 segundos.

3.3.2.4 Quantidade do calor perdido

A cobertura superior em vidro do sistema de secagem reduz as perdas de calor por convecção e radiação. Além disso, as superfícies laterais e inferiores do tanque de aço inoxidável são providas de isolamento térmico com lã de rocha, o qual tem como efeito a minimização das perdas por condução de calor. A temperatura ambiente que a câmara de secagem está inserida e mantida na faixa próxima a 20 °C pelo sistema de condicionamento de ar nas dependências do laboratório.

A quantidade de perdas de energia ($Q_{perdida}$) foi estimada conforme indicado pela NBR 15569 (ABNT, 2008) na Equação (37), utilizando 15% do valor obtido para a energia útil ($E_{útil}$) por dia.

$$Q_{perdida} = 15\% * E_{útil} = 0,15 * (136.045 \text{ kJ} + 7.391,28 \text{ kJ}) \cong 21.515 \text{ kJ} \quad (37)$$

Dessa forma, a magnitude da energia perdida para o ambiente corresponde a 21.515 kJ, aproximadamente 6 kWh, em relação a uma exigência energética útil do secador de 143.460 kJ, considerando uma redução de 15% em termos de eficiência energética.

3.3.2.5 Quantidade do calor total requerido pelo processo

A energia de entrada na câmara de secagem corresponde ao somatório do valor da energia gerada pelo coletor solar e da energia acrescentada no reservatório térmico com apoio de resistência elétrica, que são acionadas para entregar uma temperatura desejada. Empregando o balanço de energia obteve-se a quantidade do calor total requerido pelo processo igual a 164.951 kJ (45,8 kWh).

A Tabela 2 resume as estimativas de consumo energético do sistema de secagem mediante a incorporação de coletores solares para fins de aquecimento.

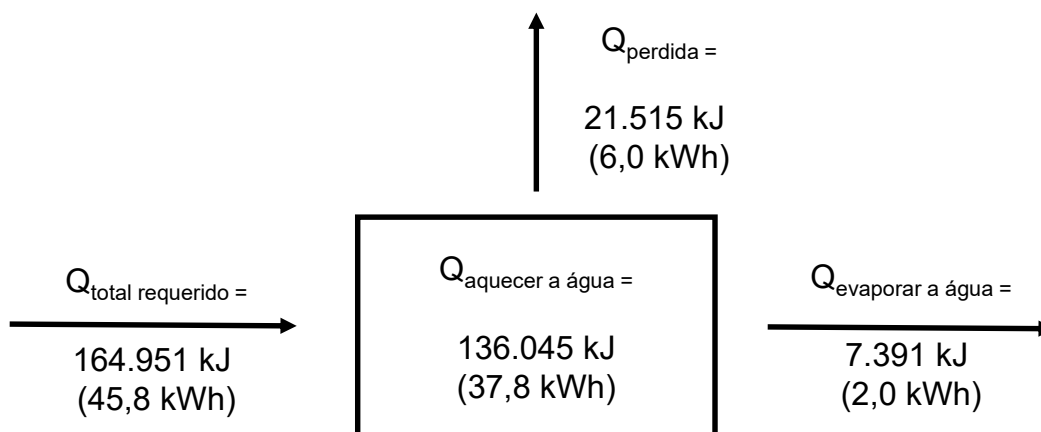
Tabela 2 - Síntese das estimativas de consumo energético do sistema de secagem mediante a incorporação de coletores solares para fins de aquecimento.

Energia de Entrada		Energia de Saída		%
$Q_{\text{coletor}} +$ $Q_{\text{reservatório}}$	164.951 kJ	$Q_{\text{aquecer a água}}$	136.045 kJ (37,8 kWh)	82,5
		Q_{perdida}	21.515 kJ (6,0 kWh)	13,1
		Q_{evaporar}	7.391 kJ (2,0 kWh)	4,4
Total	164.951 kJ	Total	164.951 kJ (45,8 kWh)	

Fonte: Autor (2023).

A Figura 16 apresenta o balanço de energia, que foi devidamente formulado para a câmara de secagem, assegurando o equilíbrio entre as entradas e saídas de energia, de modo a manter o sistema em estado estacionário.

Figura 16 - Balanço de energia na etapa de secagem



Fonte: Autor (2023).

Importa salientar que a energia empregada no processo de aquecimento da água da câmara de secagem, estimada em 136.045 kJ (ou 37,8 kWh), mantém-se em circulação independentemente do ciclo de produção por batelada, resultando em perda após a desativação dos dispositivos.

3.3.3. Mensuração do consumo elétrico dos equipamentos de apoio

Os resultados demonstraram que o consumo energético da bomba de vácuo foi de 6 kWh em uma utilização contínua de 4,5 horas para a condução do processo de secagem.

Na fase pré-produção, o banho termostático consumiu 2,3 kWh de energia elétrica em um período de 2,5 horas. Porém, no contexto do processo de secagem por batelada, o banho termostático demandou 5,9 kWh de energia elétrica para uma operação de 4 horas, totalizando um consumo energético de 8,2 kWh.

O sistema de aquecimento em estudo é composto por dois módulos de coletores solares de tubos evacuados, com uma área total de 8,946 m² e eficiência energética de 70,9%. Com base na irradiação solar média anual de 4,25 kWh/m² incidente em Florianópolis, foi estimado através da Equação (9) a área necessária capaz de suprir uma demanda energética total, sendo esse valor superior a 14,4 m².

Entretanto, experimentos prévios realizados por Roratto (2019) evidenciaram que mesmo no dia de maior incidência de radiação solar, o coletor solar de tubo evacuado não conseguiu aquecer a água até 90 °C, atingindo uma temperatura máxima de aproximadamente 70 °C no final do dia. Esse resultado pode estar relacionado à redução da eficiência do coletor solar com o aumento da temperatura da água.

Para complementar o aquecimento da água até 90 °C, atendendo às demandas energéticas necessárias, é utilizado um sistema de aquecimento auxiliar operado por uma resistência elétrica de 3 kW. Dessa forma, quando a água não alcança a temperatura desejada, o aquecimento auxiliar é acionado para elevar a temperatura até o valor pretendido.

Contudo, a demanda energética total do sistema de secagem é de 164.980 kJ ou 45,8 kWh, sendo que os dois coletores solares instalados fornecem uma média de 26,9 kWh. Logo, com o objetivo de atender à demanda energética, faz-se necessário aumentar o número de módulos de coletores solares de tubos evacuados, totalizando a instalação de quatro módulos. O incremento no número de módulos de coletores solares visa maximizar a absorção da irradiação solar disponível, potencializando a quantidade de energia térmica capturada.

As três bombas de circulação presentes no sistema são ativadas por diferenciais de temperatura e possuem potência nominal de 0,075 kW cada. Com base nas medições do consumo de energia elétrica realizadas com um medidor AC multifuncional monofásico, foi constatado um consumo médio de 1,7 kWh (1,15 kWh para a preparação e 0,55 kWh para a batelada). Essas bombas desempenham um papel fundamental na circulação do fluido térmico, contribuindo para o adequado funcionamento do sistema de aquecimento.

A Tabela 3 disponibiliza de forma resumida as informações referentes aos equipamentos elétricos empregados no secador híbrido, incluindo os valores dos consumos energéticos aferidos durante a realização dos experimentos. Esses registros constituem elementos essenciais para a análise e avaliação da eficiência energética do sistema em estudo.

Tabela 3 - Informações referentes aos equipamentos elétricos empregados

Equipamentos	Quantidade (unidade)	Tempo de utilização (h)	Potência (kW)	Consumo energético medido (kWh)	Participação do consumo energético medido (%)
Resistência do apoio auxiliar de aquecimento da água	01	Variável	3 kW	69,5 kWh	81,4%
Banho termostático	01	6,5h	1,6 kW	8,2 kWh	9,6 %
Bomba de vácuo	01	4,5h	1,35 kW	6 kWh	7,0 %
Bombas de circulação de água	03	Variável	0,075 kW	1,7 kWh	2,0 %
Total				85,4 kWh	

Fonte: Autor (2020).

Dessa maneira, a soma das médias das medições do consumo de energia foi registrada como 85,4 kWh na primeira batelada do dia. Tendo a segunda batelada uma vantagem, pois o sistema de aquecimento e o banho termostático só precisam repor as perdas de calor para garantirem o processo.

3.3.4. Irradiação solar e a variação da temperatura do sistema de aquecimento

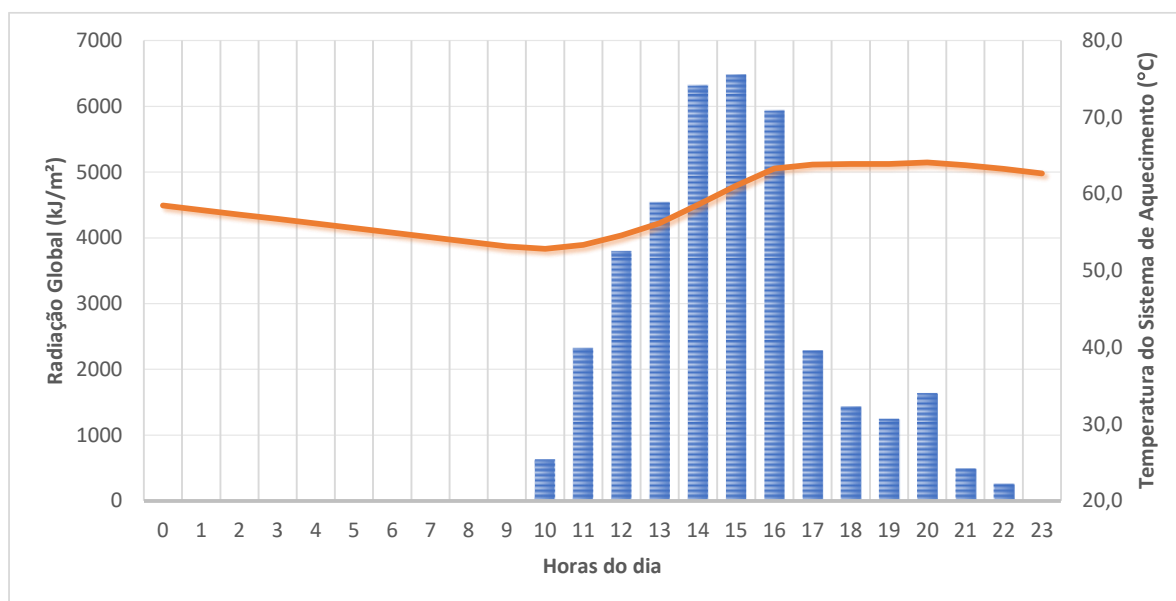
Durante a realização dos experimentos, foi observado que o índice de irradiação solar diária média incidente em Florianópolis, com Latitude de $27,599648^{\circ}$ S e Longitude de $48,518342^{\circ}$ O, foi de $3,68 \text{ kWh/m}^2$, conforme registros do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em 2019. Com base nesse nível de irradiação, o sistema composto por dois módulos de coletores solares de tubos evacuados foi capaz de gerar aproximadamente $23,3 \text{ kWh}$ de energia.

Entretanto, mesmo considerando o cálculo de dimensionamento que apontava para uma demanda energética de $45,8 \text{ kWh}$, incluindo uma estimativa de perda de energia de 15% nas tubulações e conexões, o consumo elétrico medido exclusivamente pela resistência do apoio auxiliar de aquecimento da água (reservatório térmico) foi de $69,5 \text{ kWh}$, totalizando $92,8 \text{ kWh}$.

O somatório da energia total fornecida, compreendendo a energia proveniente do coletor solar somada à energia consumida pela resistência, excedeu consideravelmente a demanda projetada. Isso ressalta uma notável perda energética durante o período noturno e evidencia a necessidade de melhorar o sistema de isolamento visando aprimorar sua eficiência energética.

A Figura 17 ilustra a média da radiação global e a variação da temperatura do sistema de aquecimento em relação às diferentes horas ao longo de um dia do período experimental em novembro de 2022.

Figura 17 – Média da radiação global e temperatura do sistema de aquecimento versus horas do dia.



Fonte: Autor (2022).

3.3.5. Cálculo da eficiência energética

A energia perdida foi de 39,6 kWh, resultante da diferença entre o fornecimento de 85,4 kWh e o consumo efetivo de 45,8 kWh. Logo, a eficiência energética do sistema atingiu 53,6%.

O SMER sendo quantificado em termos de quilogramas de umidade extraída por quilowatt-hora de energia consumida foi de 0,035 kg/kWh. E o consumo médio específico de energia (SER) foi aproximadamente de 103.000 kJ/kg de água evaporada. Dessa forma, para a análise da eficiência energética do secador, foi calculado um valor de 28,6 quilowatt-hora de energia consumida por quilograma de água evaporada.

3.3.6. Análise da viabilidade econômica do processo

3.3.6.1 Estimando os custos de produção

Levando em consideração uma proporção de 8 kg de bananas *in natura* com casca para 1 kg de banana desidratada, o custo de aquisição da matéria-

prima é de US\$ 2.040,00 /ano, com um preço de US\$ 0,35 /kg, para uma produção anual de 728 kg de banana desidratada.

O custo médio das embalagens metalizadas, que contêm 20 g cada, é de US\$ 0,01 por unidade, totalizando US\$ 360,00 /ano para uma produção anual de 728 kg de banana desidratada.

Com uma eficiência energética de 53,6%, pode-se estimar que na segunda batelada, o consumo da resistência do apoio auxiliar de aquecimento da água será aproximadamente igual a 37,3 kWh. Além disso, o consumo do banho termostático será aproximadamente igual a 4,4 kWh, somado ao consumo das bombas de circulação de água (1,7 kWh) e o consumo da bomba de vácuo (6,0 kWh), totalizando 49,4 kWh. Portanto, o consumo energético diário para duas bateladas será de 134,8 kWh, o que equivale a 49.067 kWh por ano. Assim, o custo anual aproximado é de US\$ 7.360,00 /ano.

A Tabela 4 apresenta o resumo das estimativas de custos anuais do processo.

Tabela 4 - Resumo das estimativas de custos anuais do processo

Recurso	Estimativa de custo anual	%
Energia consumida	US\$ 7.360,00	55,3
Matéria-prima	US\$ 2.040,00	15,3
Mão-de-obra direta	US\$ 3.550,00	26,7
Embalagem	US\$ 360,00	2,7
Custo Total	US\$ 13.310,00	

* Cotação média do dólar em junho de 2023 foi de R\$ 4,95/US\$.

Fonte: Autor (2023).

Portanto, o custo total de produção anual de 728 kg de banana desidratada corresponderá a US\$ 13.310,00 resultando em um custo médio de US\$ 18,29 por quilo.

3.3.6.2 Estimando a receita

Considerando custo médio de US\$ 18,29 por quilo de produto desidratado, com uma margem de lucro média esperado para o produtor de 50% (ABIA – Associação Brasileira da indústria de Alimentos, 2023) obteve-se um preço de venda no atacado de US\$ 27,44 por quilo.

Considerando os dados do Instituto Brasileiro de Planejamento e Tributação em 2023 (IBPT), a taxa média de impostos de produtos alimentícios industrializados no Brasil é de 24%. Essa taxa é composta por uma série de impostos, incluindo o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) e o Programa de Integração Social (PIS /Cofins). O preço de venda final do produtor será em média US\$ 34,02 por quilo.

Para efeito de comparação em 2023, o preço médio praticado no mercado para o consumidor final de banana desidratada liofilizada é de US\$ 60,00 por quilo. O que possibilita uma margem de lucro maior que 50% para o varejista através da venda da banana desidratada por CAPV, considerando a aquisição do produto a uma média de US\$ 34,02 por quilo. Vale ressaltar que a margem de lucro real do produtor e varejista podem variar de acordo com outros fatores, como o custo dos insumos e a concorrência no mercado.

A Tabela 5 apresenta a consolidação das receitas e custos do processo.

Tabela 5 – Dados da estimativa de receita bruta e custo

Capacidade produtiva	Receita bruta por kg	Custo por kg
2 kg /dia	US\$ 34,02 /kg	US\$ 18,29 /kg

* Cotação média do dólar em junho de 2023 foi de R\$ 4,95/US\$.

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 6 apresenta a estimativa de receita bruta e lucro bruto baseado na estimativa de uma receita bruta de US\$ 34,02 /kg e um custo de US\$ 18,29 /kg para uma produção anual estimada em 728 kg.

Tabela 6 – Estimativa de receita bruta e lucro bruto

Tempo	Receita Bruta	Lucro Bruto
Dia	US\$ 68,04	US\$ 31,46
Mês	US\$ 2.062,26	US\$ 953,52
Ano	US\$ 24.766,12	US\$ 11.451,00

* Cotação média do dólar em junho de 2023 foi de R\$ 4,95/US\$.

Fonte: Autor (2023).

3.3.6.3 Custo do equipamento

Os custos de manutenção foram estimados em cerca de 5% do faturamento bruto total da indústria, o que equivale a um custo anual estimado de US\$ 1.238,00 para o processo em questão.

Foram identificados e estimados os custos associados a esse equipamento, incluindo o custo total de instalação, custos de manutenção, cálculo da depreciação e estimativa de sua vida útil, como apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Custo associados ao equipamento

Custo associados ao equipamento	
Custo do equipamento	US\$ 16.000,00
Manutenção (12 meses)	US\$ 1.238,00
Depreciação	10,00%
Vida útil	10 anos

* Cotação média do dólar em junho de 2023 foi de R\$ 4,95/US\$.

Fonte: Autor (2023).

3.3.6.4 Fatores econômicos

A Tabela 8 exibe o fluxo de caixa descontado, abrangendo um horizonte de 10 (dez) anos, empregado para avaliar o potencial de investimento, incorporando projeções de fluxo de caixa e fatores de desconto.

Tabela 8 - Fluxo de caixa descontado

n	Depreciação	Fluxo de caixa	Fluxo de caixa acumulado	Fluxo de caixa descontado	Fluxo de caixa descontado acumulado
0	\$16.000,00	\$-16.000,00	\$-16.000,00	\$-16.000,00	\$-16.000,00
1	\$14.400,00	\$10.213,11	\$-5.786,89	\$9.192,72	\$-6.807,28
2	\$12.960,00	\$10.213,11	\$4.426,22	\$17.467,00	\$10.659,72
3	\$11.664,00	\$10.213,11	\$14.639,34	\$24.914,59	\$35.574,30
4	\$10.497,60	\$10.213,11	\$24.852,45	\$31.618,09	\$67.192,40
5	\$9.447,84	\$10.213,11	\$35.065,56	\$37.651,85	\$104.844,24
6	\$8.503,06	\$10.213,11	\$45.278,67	\$43.082,77	\$147.927,02
7	\$7.652,75	\$10.213,11	\$55.491,78	\$47.971,09	\$195.898,11
8	\$6.887,48	\$10.213,11	\$65.704,90	\$52.371,02	\$248.269,13
9	\$6.198,73	\$10.213,11	\$75.918,01	\$56.331,35	\$304.600,49
10	\$5.578,86	\$15.791,97	\$91.709,98	\$92.613,87	\$397.214,35
		\$91.709,98		\$397.214,35	

* Cotação média do dólar em junho de 2023 foi de R\$ 4,95/US\$.

Fonte: Autor (2023).

Após a elaboração do fluxo de caixa, foram determinados os valores do Valor Presente Líquido (VPL), da Taxa Interna de Retorno (TIR) e do período de retorno (*Payback*), conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores VPL, TIR e *Payback*

Ferramenta financeira	Valores
VPL	\$ 170.472,87
TIR	64 %
<i>Payback</i> descontado	< 17 meses
Indicador benefício/custo (IBC)	1,45

* Cotação média do dólar em junho de 2023 foi de R\$ 4,95/US\$.

Fonte: Autor (2023).

Um Valor Presente Líquido (VPL) positivo indica uma taxa de retorno superior à taxa mínima de atratividade, confirmando a viabilidade econômica do investimento. A Taxa Interna de Retorno (TIR) de 64% demonstra alta rentabilidade na atividade. O período de retorno necessário para recuperar o capital investido inicialmente (*payback*) inferior a 17 meses aponta para uma recuperação rápida do investimento. Além disso, os indicadores de Benefício-Custo (IBC) apontam a geração de riqueza para o investidor.

3.3.7. Quantificação da geração de carbono equivalente

Ao empregar um fator de conversão de eletricidade específico para o Brasil, que é de 0,0814 kgCO₂eq /kWh (MCTI, 2016), foi possível calcular uma pegada de carbono global variando entre 2,48 e 3,99 toneladas de CO₂ equivalentes. Essa estimativa considerou o consumo anual de 49.067 kWh de eletricidade no processo em questão (ver Tabela 10).

Tabela 10 – Estimativa de geração de carbono equivalente

Estimativa de consumo anual de eletricidade no processo	Fator de conversão de eletricidade específico para o Brasil	Geração de carbono equivalente
49.067 kWh	0,0814 kgCO ₂ eq /kWh	2,48 e 3,99 toneladas de CO ₂ equivalentes

Fonte: Autor (2023).

As emissões inerentes podem ser neutralizadas por meio de investimentos em projetos ambientais certificados. Esse processo envolve a compensação das quantidades equivalentes de CO₂ emitidas por meio do apoio e adoção de tecnologias ambientalmente limpas. Além de viabilizar financeiramente tais projetos ambientais, a neutralização de carbono contribui para a melhoria da qualidade de vida das comunidades locais e fomenta a gestão sustentável de áreas verdes.

3.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

A utilização de água para gerar e armazenar vapor em sistemas industriais, operando sob pressão acima da atmosférica, é uma prática bem estabelecida devido aos benefícios que oferece, principalmente por caldeiras, onde aumenta a eficiência no consumo de combustíveis. A proposta de utilizar água diretamente no aquecimento da câmara de secagem, por meio da geração por coletores solares, é uma abordagem conveniente. Isso se deve ao fato de que a água possui uma alta capacidade térmica e, portanto, sua temperatura varia minimamente com relação ao calor absorvido.

O estudo demonstrou elevada viabilidade econômica, com um tempo de recuperação do capital inicial inferior a 17 meses e indicadores de Benefício-Custo favoráveis. Além disso, a análise ambiental revelou uma pegada de carbono entre 2,48 e 3,99 toneladas de CO₂ equivalente, considerando o consumo anual de 49.067 kWh de eletricidade no processo.

Para sistemas de produção contínua e grandes escalas, a ideia de acumular energia térmica na água por meio de coletores solares é altamente atrativa. No entanto, para pequenos produtores que trabalham em lotes e produções menores, essa abordagem pode não ser vantajosa. Isso se deve ao tempo necessário para o aquecimento, falta de controle preciso de temperatura, tamanho do secador, surgimento de incrustações nas tubulações, necessidade de limpeza, altas perdas energéticas nas tubulações e troca térmica durante a noite. Além disso, a energia usada para aquecer a água da câmara de secagem continua circulando independentemente do ciclo de produção por lote, resultando em perdas após a desativação dos dispositivos.

Com o objetivo de fornecer um aquecimento rápido para pequenos produtores e aproveitar as energias renováveis disponíveis, surge a necessidade de um estudo abrangente para avaliar a eficiência energética, os custos, a viabilidade econômica e o impacto ambiental de um novo sistema de aquecimento. Uma possível solução envolveria o uso de resistências elétricas posicionadas diretamente sob a bandeja de secagem, com o suporte da energia fotovoltaica.

4. ESTUDO DA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM SECADOR DE ALIMENTOS PARA O PEQUENO PRODUTOR ATRAVÉS DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO ELÉTRICO COM SUPORTE DA ENERGIA FOTOVOLTAICA

4.1 INTRODUÇÃO

A proposta de utilizar água diretamente aquecida por coletores solares na câmara de secagem é promissora. A análise econômica do secador de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo com aquecimento solar para secagem de banana demonstrou elevada viabilidade, com um *payback* e indicadores de Benefício-Custo favoráveis.

Entretanto, para pequenos produtores que operam com lotes e volumes reduzidos, a acumulação de energia térmica na água por coletores solares pode não ser eficaz. A obtenção de um acionamento instantâneo desempenha um papel crucial em diversos contextos industriais e tecnológicos. Esse atributo possibilita uma resposta imediata e precisa aos comandos, desencadeando ações no momento exato em que são requisitadas. Em pequenos processos de produção, a capacidade de iniciar ou interromper operações de forma instantânea pode influenciar diretamente na eficiência, segurança e qualidade dos procedimentos.

A alternativa sugerida em estudo para o pequeno produtor é a utilização da instalação de resistência elétrica para o acionamento automático em sistemas de aquecimento, garantindo a prontidão para operação de maneira ágil e eficaz, minimizando possíveis danos e perdas. Portanto, a incorporação de acionamentos instantâneos em projetos e sistemas de aquecimento apresenta uma relevância substancial na melhoria dos processos industriais voltados ao pequeno produtor e no aprimoramento da operação em diversos setores.

Conforme destacado por Kemp (2011), as penalidades de energia podem ser categorizadas em diversas áreas: a) Ineficiências térmicas no secador, englobando perdas de calor na exaustão em secadores convectivos, aquecimento não eficiente dos sólidos e perdas de calor do corpo do secador; b) Ineficiências térmicas no sistema de utilidade (fornecimento de calor), que incluem a eficiência

na geração de vapor, vazamentos de vapor e perdas na rede de distribuição; e c) Demandas energéticas suplementares, tais como a energia necessária para o transporte de sólidos, operação de bombas de vácuo e funcionamento de ventiladores de ar.

Conforme apontado por Menon, A., Stojceska, V., & Tassou, S. (2020), as pesquisas futuras devem se dedicar ao desenvolvimento de tecnologias de secagem que sejam eficientes em termos de energia, economicamente viáveis, ambientalmente sustentáveis e que possam manter a qualidade do produto desidratado, garantindo a mínima perda de cor, aparência, sabor, textura e componentes químicos em alimentos desidratados.

Dessa forma, uma estratégia para a redução dos custos relacionados à eletricidade consiste na implementação da geração distribuída por meio de energia solar fotovoltaica no processo de secagem de alimentos. Essa abordagem pode se revelar uma solução significativa para famílias que residem em pequenas propriedades localizadas em áreas áridas e semiáridas. Diante desse contexto, o propósito deste capítulo é avaliar a melhoria do sistema de aquecimento, avaliar a eficiência e avaliar a viabilidade econômica do dispositivo experimental, incorporando resistências elétricas e suporte de energia fotovoltaica.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1. Preparação das amostras

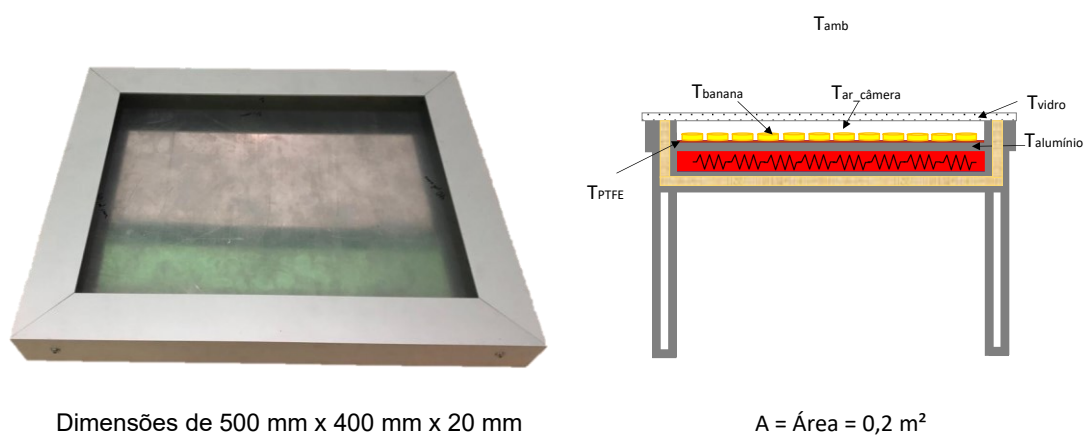
Bananas frescas da variedade Prata (*Musa Sapientum* L.), adquiridas em Sobral, Ceará, foram selecionadas com base na cor da casca e teor de sólidos solúveis (TSS). O TSS foi determinado utilizando um refratômetro óptico com resolução 0,1 °Brix (Refratômetro de bolso Atago, Modelo - PAL-BX/RI, Japão). Após lavagem, as bananas foram manualmente descascadas e cortadas em fatias de 5 mm. Para o experimento, cerca de 1.000 g de fatias foram colocadas em folhas antiaderentes de PTFE. Posteriormente, as amostras foram transferidas para uma câmara de secagem. Termopares foram usados para monitorar a temperatura durante a secagem.

4.2.2. Dispositivo experimental construído e empregado para desidratação com aquecimento elétrico

Desenvolvido no Laboratório de Eletrônica de Potência do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) Campus Sobral – CE (ver **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), o dispositivo experimental utilizado para observação e análise do sistema de aquecimento elétrico destinado à desidratação de frutos consiste em uma placa plana de alumínio encapsulada por uma estrutura laminar adjacente. Essa configuração forma uma câmara de secagem com dimensões de 500 mm x 400 mm x 20 mm, a qual é posteriormente coberta por uma tampa de vidro temperado medindo 500 mm x 400 mm x 10 mm.

A Figura 18 ilustra o equipamento experimental construído e empregado para a secagem de frutos com aquecimento elétrico.

Figura 18 - Equipamento experimental empregado para a secagem de frutos com aquecimento elétrico



Fonte: Autor (2023).

De forma uniforme e estratégica, um elemento resistivo de 1800 W, operando a 220 V, foi integrado à parte inferior da placa de alumínio. Este componente está diretamente vinculado a termoelementos do tipo J e é controlado por um controlador de temperatura digital microprocessado (Modelo COEL, K48E, 220 V). Essa configuração permite uma regulação eficiente e precisa da temperatura de acordo com os parâmetros continuamente estabelecidos.

O sistema possui um eficiente isolamento térmico, sendo envolvido externamente por uma manta composta de fibra de cerâmica. Essa camada, reconhecida por sua baixa condutividade térmica e reduzida capacidade de retenção de calor, é aplicada de maneira abrangente, cobrindo tanto a região inferior quanto as laterais do dispositivo em análise. A espessura do revestimento, uniformemente mantida em 25 mm, contribui para a redução da dissipação de energia.

Importante salientar que o conceito subjacente a este equipamento contempla uma abordagem modular, permitindo a ampliação da capacidade de produção por meio da incorporação de módulos suplementares e independentes.

4.2.3. Pressupostos

Conforme discutido na seção 3.2.3.1, este estudo incorporou simplificações específicas. O modelo adotado assume um regime permanente, presumindo que as condições operacionais e as propriedades do material permaneçam inalteradas ao longo do processo de secagem. Além disso, considerou-se a ausência de transferência de calor ou massa através das paredes das câmaras de secagem, desconsiderando efeitos provenientes do ambiente circundante e enfocando apenas nas interações internas do sistema. Todos os elementos do sistema foram tratados como adiabáticos, implicando na ausência de trocas de calor com o meio ambiente externo.

Os principais parâmetros e considerações desta pesquisa já foram discutidos no Quadro 3. Contudo, vale destacar que o foco de estudo nessa parte da pesquisa é aprimorar o sistema de aquecimento, a eficiência e avaliar sua viabilidade econômica do dispositivo experimental de aquecimento.

4.2.4. Taxa de transferência de calor por condução

De modo simplificado, quando C_p é independente da temperatura, a definição de calor específico é dada pela Equação (38):

$$C_p = \frac{Q}{m \times \Delta T} \left[\frac{kJ}{kg \times ^\circ C} \right] \quad (38)$$

Costa (2008), para uma temperatura de 27 °C, determinou que a condutividade térmica da banana com uma umidade média de 75% será de $k = 0,481 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$, com $\rho = 980 \text{ kg/m}^3$ e $c_p = 3,346 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$.

A taxa de transferência de calor por condução, em estado estacionário é calculada pela Equação (39)(39).

$$\dot{q} = \frac{Q}{t} = kA \frac{T_q - T_f}{L} \quad (39)$$

onde,

\dot{q} é a taxa de transferência de calor [J /s];

Q é o calor transferido, em Joules [J];

t é o tempo, em segundos [s];

k é a condutividade térmica [W /m°C];

A é a área de uma placa [m²];

L é a espessura de uma placa [m];

T_q é a temperatura da fonte quente [°C];

T_f é a temperatura da fonte fria [°C];

4.2.5. Dimensionamento do sistema fotovoltaico

O dimensionamento do sistema fotovoltaico (FV) foi baseado nas etapas do projeto, segundo Pinho e Galdino (2014).

4.2.4.1 Levantamento adequado do recurso solar disponível no local

O conceito de Horas de Sol Pleno (HSP) denota as horas diárias em que a radiação solar se mantém constante, 1.000 W/m². O cálculo de HSP segue a Equação (40), onde R_{SG} é radiação solar diária [kW/m²]:

$$HSP = \frac{R_{SG}}{1 [kW/m^2]} \quad (40)$$

Para a avaliação da irradiação solar diária média mensal para localidades no Brasil utilizou-se o banco de dados de Radiação Solar do CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito, via ferramenta *SunData*.

4.2.4.1 Levantamento adequado de demanda e consumo de energia elétrica

Para calcular a quantidade de energia a ser gerada, foi realizada uma estimativa do consumo médio de eletricidade. Além disso, foi considerado o desconto resultante da redução da disponibilidade mínima do sistema elétrico no cálculo da fatura mensal do consumidor.

4.2.4.2 Dimensionamento do gerador fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos foram dimensionados conforme as especificações do inversor, considerando valores máximos de tensão, corrente e potência, bem como a faixa de operação do ponto de máxima potência (MTTP). O cálculo da potência máxima do módulo fotovoltaico foi realizado utilizando a Equação (41).

$$P_{FV}(Wp) = \frac{E}{HSP_{MA} \cdot TD} \quad (41)$$

onde,

P_{FV} (Wp) é a potência de pico do módulo FV;

E (Wh/dia) é o consumo diário médio anual da edificação ou fração deste;

HSP_{MA} (h) é a média diária anual das HSP incidente no plano do módulo

FV;

TD (adimensional) é a taxa de desempenho.

Tanto a temperatura ambiente quanto a tecnologia fotovoltaica utilizada exercem uma influência significativa no desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Considerando as condições de radiação solar no Brasil, estabeleceu-se uma taxa de desempenho em 80%.

4.2.4.3 Dimensionamento dos inversores

A escolha do inversor é condicionada por diversos fatores, como a potência do gerador fotovoltaico (FV), a tecnologia dos módulos, as características elétricas dos módulos classificados, a orientação e a inclinação dos painéis, bem como as condições ambientais locais. Para melhorar a relação custo/benefício, é fundamental ajustar a potência do inversor de maneira apropriada. O Fator de Dimensionamento de Inversor (FDI) representa a relação entre a potência máxima de saída nominal do inversor e a potência de pico dos módulos fotovoltaicos instalados, como ilustrado na Equação (42).

$$FDI = \frac{P_{Nca}(W)}{P_{FV}(Wp)} \quad (42)$$

onde,

FDI (adimensional) é o fator de dimensionamento do inversor;

P_{Nca} (W) é a potência nominal em corrente alternada do inversor;

P_{FV} (Wp) é a potência pico do módulo fotovoltaico.

Conforme diretrizes de fabricantes e instaladores, sugere-se um Fator de Dimensionamento de Inversor (FDI) variando de 0,75 a 1,05.

O inversor instalado é da fabricante Goodwe, o modelo GW15KT-DT, os dados técnicos do inversor classificado são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Dados técnicos do inversor solar instalado

Dados de Entrada CC	GW15KT-DT
Máx. Potência Fotovoltaica [W]	25.500
Máxima Tensão CC [V]	1.000
Faixa de Operação SPMP (MPPT) [V]	180~850
Tensão CC de Partida [V]	160
Corrente CC Máxima [A]	25 /12,5
N° <i>Strings</i> / MTTP	2/1
Dados de Saída CA	
Potência CA Nominal [W]	15.000
Máxima Potência CA [W]	16.500
Máxima Corrente CA [A]	24,0
Tensão nominal CA [V]	180 - 270
Rendimento	
Máxima Eficiência [%]	98,3

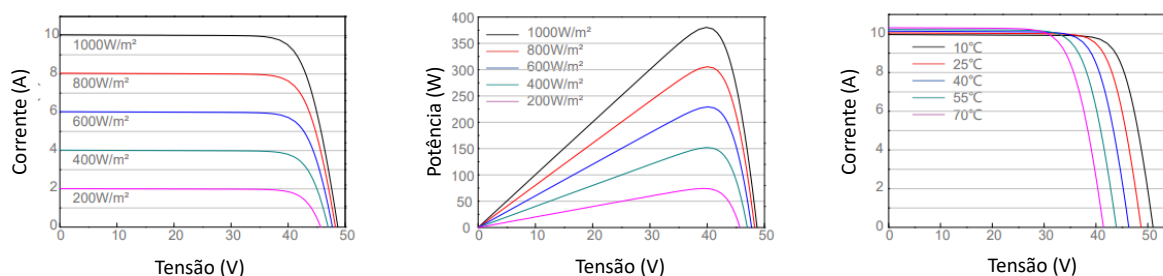
Fonte: Adaptado do *Datasheet* GW15KT-DT (GOODWE, 2022).

4.2.4.4 Módulos fotovoltaicos

Com o objetivo de validar o estudo e a adequação do dimensionamento do sistema fotovoltaico para o processo de secagem com resistência elétrica, recorreu-se ao sistema de geração instalado nas dependências do IFCE. Esse sistema consiste em 32 módulos fotovoltaicos, cada um com uma capacidade nominal de 390 Wp.

A radiação solar incidente constitui o fator preponderante na influência do rendimento de um módulo fotovoltaico. A geração de potência elétrica guarda proporção direta com a quantidade de radiação solar incidente sobre a superfície da célula. Conseqüentemente, um aumento na irradiância resulta em um incremento na corrente elétrica, promovendo o aumento na produção de energia. Porém, o principal efeito do aumento na temperatura do módulo fotovoltaico é a queda da tensão, que diminui linearmente com a subida da temperatura do módulo, o efeito na corrente é menor conforme ilustrado na Figura 19, que apresenta mais algumas características do módulo fotovoltaico instalado.

Figura 19 – Características do módulo fotovoltaico instalado.



Fonte: Adaptado de Datasheet JAM72 S01 370-390/PR/1000V. Disponível em: <https://www.jasolar.com/uploadfile/2018/1215/20181215014429611.pdf>

A Figura 20 exibe os dispositivos implementados para a geração de energia fotovoltaica, empregados na validação da análise energética.

Figura 20 – Equipamentos para geração da energia fotovoltaica utilizados para validação do estudo energético



a) Características do módulo fotovoltaico

b) Inversor

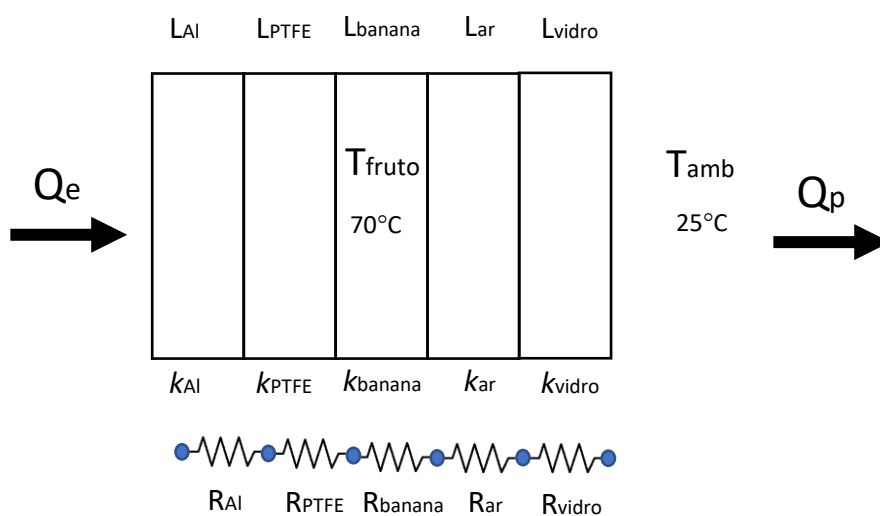
Fonte: Autor (2023)

4.2.6. Dimensionamento do sistema de aquecimento

A aplicação do modelo elétrico no dimensionamento de sistemas térmicos não apenas simplifica a análise, mas também proporciona uma estrutura conceitual mais acessível para projetar e melhorar a eficiência térmica e o desempenho global do sistema em consideração.

A Figura 21 ilustra uma representação gráfica do modelo elétrico empregado para analisar a transferência de calor, com as espessuras (L) e as respectivas resistências (R) dos componentes do equipamento de desidratação com aquecimento elétrico empregado no experimento são explicitamente retratadas.

Figura 21 – Analogia do modelo elétrico da transferência de calor e suas resistências.



Fonte: Autor (2023).

A resistência térmica equivalente do sistema (R_{eq}) é definida como a relação entre a diferença de temperatura e o fluxo de calor, representando a soma em série das resistências de condução interna, de acordo com a Equação (43)(43).

$$R_{eq} = R_{Al} + R_{PTFE} + R_{banana} \quad (43)$$

onde,

R_{AL} é a resistência térmica do alumínio;

R_{PTFE} é a resistência térmica do politetrafluoretileno; e

R_{banana} é a resistência térmica das fatias de banana.

Assim, a resistência térmica do alumínio é dada por pela Equação (44), a resistência térmica do politetrafluoretileno (PTFE) é dada por Equação (45) e a resistência térmica da banana fatiada é dada por Equação (46)(46).

$$R_{Al} = \frac{L_{Al}}{k_{Al} * A} \quad (44)$$

$$R_{PTFE} = \frac{L_{PTFE}}{k_{PTFE} * A} \quad (45)$$

$$R_{banana} = \frac{L_{banana}}{k_{banana} * A} \quad (46)$$

onde,

A é a área onde $A = A_{Al} = A_{PTFE}$, $A = 0,5 * 0,4 = 0,2 \text{ m}^2$;

A_{Total} da banana = $\pi/4 * A_{Al} = 78,54\% * A_{Al}$

L_{Al} é a espessura da chapa de alumínio, $L_{Al} = 0,01 \text{ m}$;

k_{Al} é a condutividade térmica do alumínio, $k_{Al} = 237 \text{ W/m}^\circ\text{C}$;

L_{PTFE} é a espessura da folha do politetrafluoretileno, $L_{PTFE} = 0,0002 \text{ m}$;

k_{PTFE} é a condutividade térmica do politetrafluoretileno, $k_{PTFE} = 0,24 \text{ W/m}^\circ\text{C}$;

L_{banana} é a espessura da banana fatiada, $L_{banana} = 0,005 \text{ m}$; e

k_{banana} é a condutividade térmica da banana, $k_{banana} = 0,481 \text{ W/m}^\circ\text{C}$;

Neste estudo, devido às temperaturas baixas e às pequenas dimensões das cavidades no espaço intersticial, a transferência de calor por convecção e radiação foi desconsiderada.

A área de contato para transferência de calor é a soma das áreas as superfícies das frutas em contato com a placa aquecida. A relação das áreas circular da banana distribuída sobre uma área quadrada da placa de alumínio, para um raio (r) igual a metade do lado (l) do quadrado, pode ser calculada pela Equação (47):

$$\text{Área}_{\text{Circulo}} = \alpha \cdot \text{Área}_{\text{Quadrado}}$$

(47)

$$\text{onde: } \alpha = \frac{\text{Área}_{\text{Circulo}}}{\text{Área}_{\text{Quadrado}}} = \frac{\pi r^2}{l^2} = \frac{\pi \left(\frac{l}{2}\right)^2}{l^2} = \frac{\pi}{4} \cong 78,54\%$$

A fim de realizar o cálculo da dissipação energética inerente ao sistema pela parte superior do dispositivo, é imperativo determinar a resistência equivalente correspondente ao ar e ao vidro conforme estipulado na Equação (48).

$$R_{eq} = R_{ar} + R_{vidro} \quad (48)$$

De maneira que a resistência térmica do ar (R_{ar}) é dada pela Equação (49) e a resistência térmica do vidro (R_{vidro}) é dada pela Equação (50).

$$R_{ar} = \frac{L_{ar}}{k_{ar} * A} \quad (49)$$

$$R_{vidro} = \frac{L_{vidro}}{k_{vidro} * A} \quad (50)$$

onde,

A é a área onde $A = A_{ar} = A_{vidro}$, $A = 0,5 * 0,4 = 0,2 \text{ m}^2$;

L_{ar} é a altura da câmara onde fica o ar, $L_{ar} = 0,2 \text{ m}$;

k_{ar} é a condutividade térmica do ar, $k_{ar} = 0,03 \text{ W /m}^\circ\text{C}$;

L_{vidro} é a espessura do vidro, $L_{vidro} = 0,02 \text{ m}$;

k_{vidro} é a condutividade térmica do vidro, $k_{vidro} = 0,8 \text{ W /m}^\circ\text{C}$;

Em virtude de sua menor condutividade térmica, o ar reduz a condução de calor. Com a subsequente diminuição da pressão, espera-se que o ar encapsulado a 40 mbar permita uma transferência térmica limitada, aprimorando o isolamento térmico devido à diminuição da densidade das moléculas de ar.

Levando em consideração a resistência térmica equivalente calculada, e tendo em vista o objetivo de alcançar uma homogeneidade térmica de 70 °C, assegurando a premissa do estágio inicial da etapa de secagem, no qual o sistema de secagem encontra-se em equilíbrio com a temperatura ambiente de 25 °C, a taxa de transferência de calor perdida (\dot{Q}_p) é calculada pela Equação (51).

$$\dot{Q}_p = \frac{T_2 - T_1}{R_{eq}} \quad (51)$$

4.2.7. Balanço de massa

Foi estabelecida como pressuposto a utilização de 1.000 g de banana, previamente descascada e cortada, com uma umidade inicial média de aproximadamente 75%, e uma expectativa de umidade final média de $0,01 \pm 0,005$ g de água por grama de sólidos secos.

O balanço de massa para a obtenção de banana desidratada pode ser expresso da seguinte forma:

$$1000 \text{ g} * (0,25) = \dot{m}_3 * (0,99) \rightarrow \dot{m}_3 = 252,5 \text{ g} \quad (52)$$

4.2.8. Medições do consumo de energia elétrica e acompanhamento da distribuição do calor

Para avaliar o dispositivo experimental de secagem com suporte elétrico, foram empregados instrumentos como o Termovisor i40 - Flir, para mapear a distribuição térmica, e um controlador de temperatura digital microprocessado (Modelo COEL, K48E, 220 V), conectado a sensores termopar do tipo J. Esses sensores foram posicionados na superfície da placa de alumínio e no centro da banana fatiada. A quantificação do consumo de energia foi realizada com medidores multifuncionais monofásicos de energia elétrica AC, medindo tensão, corrente, potência e energia consumida. Os dados foram coletados nas saídas do secador, com cálculos baseados na média dos registros de consumo.

4.2.9. Análise de viabilidade econômica

Para efeitos de comparação de custos de produção e eficiência em relação ao experimento do secador de aquecimento por pulso de vácuo com suporte de coletores solares (Capítulo 3), foi decidido utilizar 04 módulos do equipamento com resistência elétrica por batelada.

Utilizou-se a mesma metodologia apresentada no item 3.2.4.

4.2.10. Quantificação da geração de carbono equivalente

Utilizou-se a mesma metodologia apresentada no item 3.2.5.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.3.1. Dimensionamento do sistema de aquecimento do secador

As resistências térmicas calculadas para os componentes do sistema foram de $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$ para o alumínio, através da Equação (44), $4,210^{-3} \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$ para o politetrafluoretileno (PTFE), através da Equação (45) e $66,210^{-3} \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$ para a banana fatiada, através da Equação (46). Dessa forma, a resistência térmica equivalente do sistema é aproximadamente $72,5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$, sendo notável que aproximadamente 90% dessa resistência provém da contribuição da resistência térmica da banana. Logo, as resistências térmicas da placa de alumínio e da folha de politetrafluoretileno podem ser desconsideradas, já que não contribuem de forma substancial para a resistência térmica global do sistema.

Dessa maneira, é obtida uma resistência térmica equivalente aproximada de $33,4 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$ e aplicando a Equação (51), o resultado da taxa de perda de transferência de calor foi de $1,35 \text{ J / s}$.

A insignificante magnitude desse valor em relação à energia transferida para o sistema justifica sua exclusão nos cálculos, sendo ressaltada assim a eficácia do isolamento térmico.

4.3.2. Balanço de massa

Ao empregar 1.000 g de banana em sua configuração original, após descascamento e corte em fatias, é possível alcançar, ao término do ciclo operacional mediante a utilização da técnica de secagem de aquecimento-pulso de vácuo, um rendimento de 252,5 g de banana desidratada por batelada, com uma massa de água evaporada evaporada (m_2) de aproximadamente 747,5 g.

4.3.3. Balanço de energia

Utilizando a Equação (6), tem-se que o calor removido durante o processo de secagem pode ser determinado como o produto do calor latente de vaporização pela quantidade de água vaporizada. Assim, considerando um calor latente de vaporização $\lambda = 2.472 \text{ kJ.kg}^{-1}$ e uma massa de água vaporizada de $m_2 = 747,5 \text{ g}$, é possível determinar que a quantidade de calor necessário para a evaporação da água da fruta, ou seja, o calor removido durante o processo de secagem, será de 1.847,8 kJ ou 0,513 kWh.

A energia requerida para elevar e manter o sistema próximo a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ é de 218,7 kJ, considerando uma perda de 20% para manter o equipamento aquecido até o final do processo, totalizando aproximadamente 262,4 kJ. A soma das energias demandadas proporciona uma estimativa do calor total a ser fornecido para o sistema de secagem. Os detalhes das estimativas de consumo energético da câmara de secagem, com a implementação do acionamento direto na placa de alumínio por meio de resistência elétrica para fins de aquecimento, estão resumidos na Tabela 12.

Tabela 12 – Síntese do consumo energético da câmara de secagem mediante a incorporação do acionamento direto na placa de alumínio por resistência elétrica

Calor necessário para manter o sistema aquecido	262,4 kJ
Calor necessário para aquecer a banana	150,57 kJ
Calor necessário para evaporar a água da fruta	1.847,8 kJ
Total	2.260,77 kJ ou 0,63 kWh

Fonte: Autor (2023).

Portanto, o consumo energético teórico da câmara de secagem, ao empregar o acionamento direto na placa de alumínio por meio de resistência elétrica para aquecimento, será de 2.260,77 kJ, equivalente a 0,63 kWh.

No APÊNDICE A foi realizada uma análise da relação existente entre a massa da banana e a quantidade de energia elétrica consumida durante o decorrer do processo.

4.3.4. Medições do consumo de energia elétrica e acompanhamento da distribuição do calor

O termovisor infravermelho utilizado para medir a temperatura opera pela detecção da radiação térmica emitida pela superfície do objeto. Mesmo em um ambiente controlado a 25 °C, com o mesmo ângulo de visão, devido às propriedades de emissividade do alumínio e sua capacidade de refletir a radiação, a captura de imagens térmicas só foi possível quando a tampa de vidro foi removida (Figura 22, “a” e “b”).

Conduziu-se a medição da temperatura utilizando uma folha de politetrafluoretileno (PTFE) posicionada sobre a superfície da chapa de alumínio, com o propósito de facilitar a aquisição de imagens térmicas. Entretanto, devido à característica de não aderência do PTFE, ocorreu a formação de bolsas de ar, comprometendo a precisão da leitura (Figura 22, “c” e “d”). Assim, para minimizar possíveis distorções nas temperaturas da superfície, foi necessário aplicar uma camada de tinta preta de alta temperatura (600°C) na chapa de alumínio (Figura 22, “e” e “f”). Esse procedimento foi adotado na tentativa de melhorar a precisão das leituras termográficas.

Figura 22 – Teste experimental para confirmação da distribuição homogênea de calor por meio de imagem termográfica.



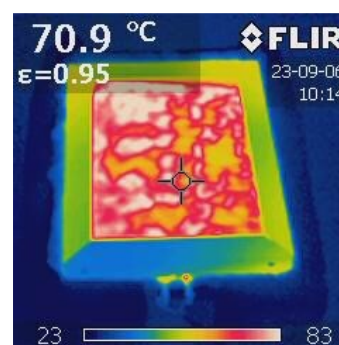
a) Dispositivo experimental



b) Devido ao efeito de reflexão do alumínio, a imagem termográfica não conseguia ser capturada.



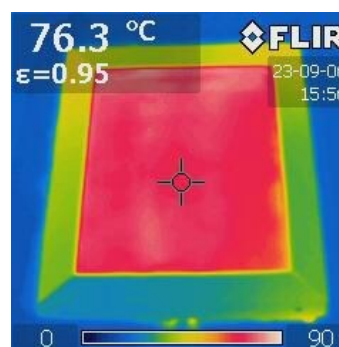
c) Dispositivo experimental coberto com PTFE



d) Devido à não aderência do PTFE, ocorreu a formação de bolsas de ar comprometendo a precisão da leitura.



e) Dispositivo experimental coberto com tinta preta especial de alta temperatura



f) Precisão das leituras termográficas e confirmação da distribuição homogênea de calor

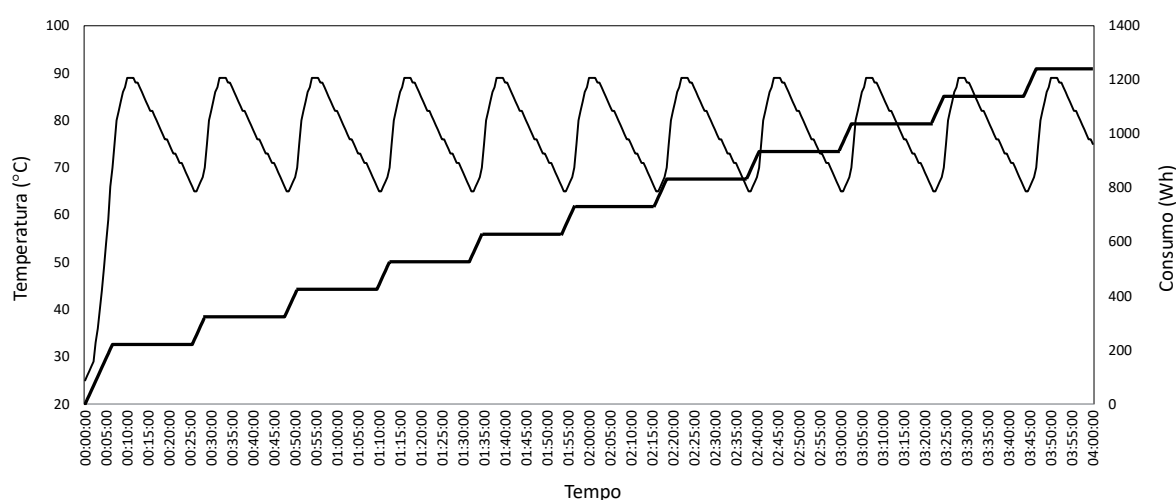
Fonte: Autor (2023)

Registrou-se o comportamento temporal da temperatura e do consumo elétrico durante 4h de secagem (batelada de produção). Procurou-se estabelecer um intervalo de controle de temperatura entre 65 °C e 75 °C, no entanto, ao desligar a fonte de energia, a temperatura continuava a aumentar, atingindo valores

próximos a 89 °C. Portanto, é necessário reduzir o intervalo para obter um controle mais preciso da temperatura.

O período requerido para elevar a temperatura da superfície da placa de alumínio de 25 °C para 70 °C, utilizando o sistema de aquecimento por resistência elétrica, foi de 390 segundos, acompanhado de um consumo elétrico de 230 Wh. Após manter o sistema aquecido próximo de 70 °C por 4 horas, o consumo elétrico totalizou 1,2 kWh (ver Figura 23).

Figura 23 – Comportamento da temperatura (—) e do consumo elétrico (- - -)



Fonte: Autor (2023).

Mantendo todas as outras variáveis constantes (*Ceteris Paribus*), os valores associados aos dispositivos elétricos utilizados no secador de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo com aquecimento com coletor solar permanecerão os mesmos conforme detalhados na seção 3.3.3, bem como os consumos de energia correspondentes, que foram previamente medidos durante a condução dos experimentos.

A Tabela 13 disponibiliza de forma resumida as informações referentes aos equipamentos elétricos empregados no secador de aquecimento-pulso de vácuo, incluindo os novos valores para o aquecimento da câmara de secagem.

Tabela 13 - Informações referentes aos equipamentos elétricos empregados

Equipamentos	Quantidade (unidade)	Tempo de utilização (h)	Potência (kW)	Consumo energético medido (kWh)	%
Resistência elétrica para aquecimento direto	01	Variável	1,8 kW	1,2 kWh	7,8
Banho termostático	01	6,5h	1,6 kW	8,2 kWh	53,2
Bomba de vácuo	01	4,5h	1,35 kW	6 kWh	39,0
Total				15,4	
				kWh/módulo/batelada	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 14 apresenta o consumo médio de energia elétrica de um sistema de secagem em uma batelada.

Tabela 14 - Consumo médio de energia elétrica em uma batelada

Número	Diário	Mensal	Anual
01 Módulo (1x/dia)	15,4 kWh	462 kWh	5.606 kWh
04 Módulos (1x/dia)	19 kWh	570 kWh	6.916 kWh
04 Módulos (2x/dia)	38 kWh	1.140 kWh	13.832 kWh

Fonte: Autor (2023).

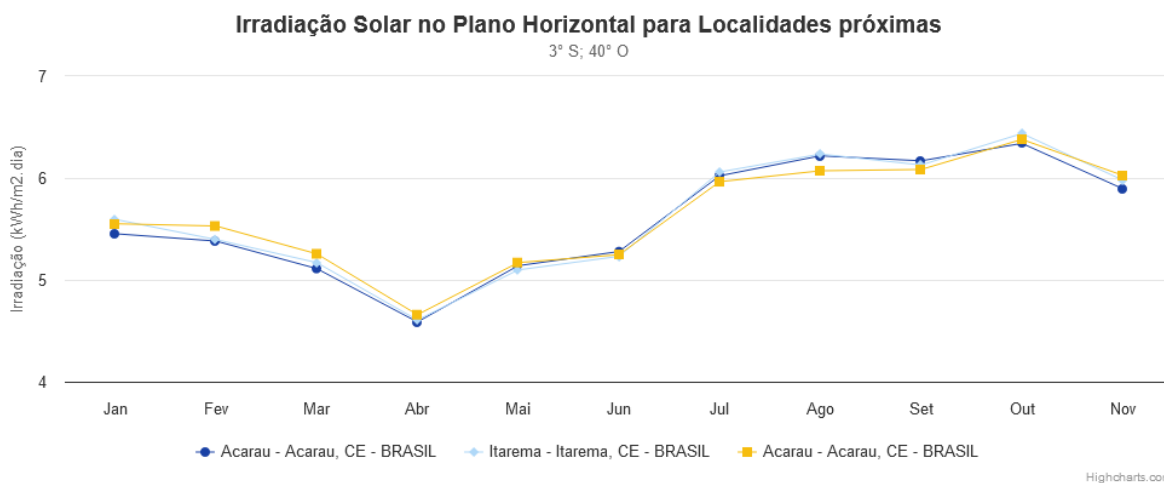
Dessa forma, o consumo médio mensal estimado de energia elétrica de um sistema de secagem com 04 módulos, operando duas vezes por dia, totalizará 1.140 kWh, para uma produção mensal de 60 kg de banana desidratada.

Ao fornecer 1,2 kWh para suprir uma demanda de 0,63 kWh, a eficiência energética do sistema atingiu 52,5%.

4.3.5. Sistema fotovoltaico

Durante a realização dos experimentos, foi observado que o índice de irradiação solar diária média incidente em Sobral, com Latitude de 3°40'57.3"S ° S e Longitude de 40°20'27.7" O (ver Figura 24), foi de 5,59 kWh/m², conforme registros do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em 2023.

Figura 24 – Nível de irradiação solar diária média incidente em Sobral



Fonte: CERESB (2023). Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>

Para atender a uma demanda diária de 38 kWh de energia elétrica, considerando o uso de 4 módulos fotovoltaicos duas vezes ao dia, a potência de pico do módulo fotovoltaico necessária é estimada em aproximadamente 8,5 kWp.

No processo de dimensionamento, foi selecionado um módulo solar monocristalino com uma potência nominal de 390 W, considerando as instalações já presentes no IFCE. Para determinar a quantidade necessária de módulos, realizou-se a divisão da potência nominal do sistema (Wp) pela potência nominal de cada módulo (W), resultando em um total de 22 módulos necessários.

A instalação fotovoltaica, que está integrada à rede elétrica do *Campus* Sobral do IFCE, é constituída por 32 módulos fotovoltaicos monocristalinos da série JAM72 390/PR/1000V, fabricados pela JA Solar. Esses módulos são conectados em série e foram selecionados considerando critérios como o custo dos módulos fotovoltaicos e a confiabilidade do fabricante em relação aos parâmetros elétricos, conforme detalhado na Tabela 15.

. Apresentam uma eficiência de $\eta = 20,1\%$ e contam com garantias de 12 anos para a fabricação do produto e 25 anos de garantia linear de energia.

Tabela 15 - Características do módulo solar instalado.

Fabricante	Modelo	Potência P_{MAX}	Tensão V_{MPP}	Corrente I_{MPP}	Tensão de Circuito Aberto	Corrente de Curto- Circuito	Tensão máx. do sistema
JA Solar	JAM72S 01390	390 Wp	40,61 V	9,61 A	49,28 V	10,16 A	1.000 V _{DC}

Fonte: *Datasheet* JAM72 S01 370-390/PR/1000V. Disponível em:
<https://www.jasolar.com/uploadfile/2018/1215/20181215014429611.pdf>

Durante o período compreendido entre março e setembro de 2023, foi realizado um acompanhamento do sistema fotovoltaico instalado, através dos dados fornecidos pelo inversor GW15KT-DT, comprovando uma capacidade de produção média diária de 62 kWh de energia elétrica.

A energia excedente gerada pode ser utilizada para atender a outras demandas energéticas do produtor ou potencialmente permitir a expansão do número de módulos de secagem.

4.3.6. Análise da viabilidade econômica do processo

4.3.6.1 Estimativa de investimento no sistema fotovoltaico

Ao considerar uma demanda mensal de 1.140 kWh de energia elétrica e uma tarifa de \$ 0,15 por kWh (resolução homologatória nº 3.185, de 22 de abril de 2023), o custo mensal aproximado será de \$ 171,00, excluindo impostos. Para atender a essa demanda em um contexto industrial localizado em Sobral (CE), será necessário um investimento aproximado de \$ 12.222,00 (cotação média em junho de 2023) em um sistema de energia solar. Estima-se que o período de recuperação (*payback*) desse investimento seja de aproximadamente 51 meses, o que equivale a 4,3 anos (cotação média do dólar em junho de 2023 foi de R\$ 4,95/US\$).

4.3.6.2 Estimando os custos de produção

Os custos utilizados foram os mesmos apresentados na seção 3.3.6.1, com a única alteração referente ao custo de energia. Considerando uma demanda energética anual de 13.832 kWh, o custo anual aproximado é de US\$ 2.075,00.

A Tabela 16 apresenta o resumo das estimativas de custos anuais do processo.

Tabela 16 - Resumo das estimativas de custos anuais do processo

Recurso	Estimativa de custo anual	%
Energia consumida	US\$ 2.075,00	25,9
Matéria-prima	US\$ 2.040,00	25,4
Mão-de-obra direta	US\$ 3.550,00	44,2
Embalagem	US\$ 360,00	4,5
Custo Total	US\$ 8.025,00	

* Cotação média do dólar em junho de 2023 foi de R\$ 4,95/US\$.

Fonte: Autor (2023).

Portanto, o custo total de produção anual de 728 kg de banana desidratada corresponderá a US\$ 8.025 /ano, resultando em um custo médio de US\$ 11,02 por quilo.

4.3.6.3 Estimando de receita

Foram utilizadas as mesmas receitas mencionadas na seção 3.3.6.2, com a alteração do custo médio de US\$ 11,02 por quilo e da redução da despesa com energia elétrica a partir do 4,3 ano, conforme estimado na seção 4.3.6.1.

A Tabela 17 apresenta a consolidação das receitas e custos do processo.

Tabela 17 – Dados da estimativa de receita e custo

Capacidade produtiva	Receita bruta por kg	Custo por kg
2 kg /dia	US\$ 34,02 /kg	US\$ 11,02 /kg

* Cotação média do dólar em junho de 2023 foi de R\$ 4,95/US\$.

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 18 apresenta a estimativa de receita bruta e lucro bruto.

Tabela 18 – Estimativa de receita bruta e lucro bruto

Tempo	Receita Bruta	Lucro Bruto
Dia	US\$ 68,04	US\$ 46,00
Mês	US\$ 2.062,26	US\$ 1.394,22
Ano	US\$ 24.766,12	US\$ 16.743,56

* Cotação média do dólar em junho de 2023 foi de R\$ 4,95/US\$.

Fonte: Autor (2023).

4.3.6.4 Custo do equipamento

Os custos relacionados a este equipamento foram identificados e estimados (cotação média em junho de 2023), abrangendo o custo total de instalação, despesas de manutenção, cálculo da depreciação e projeção de sua vida útil, conforme detalhado na Tabela 19.

Tabela 19 - Custo associados ao equipamento experimental

Custo associados ao equipamento	
Kit solar	US\$ 12.222,00
Custo do equipamento	US\$ 8.080,00
Manutenção (12 meses)	US\$ 1.238,31
Depreciação	10,00%
Vida útil	10 anos

* Cotação média do dólar em junho de 2023 foi de R\$ 4,95/US\$.

Fonte: Autor (2023).

4.3.6.5 Fatores econômicos

A Tabela 20 ilustra o fluxo de caixa descontado para um período de 10 anos, compreendendo projeções e fatores de desconto pertinentes ao processo de análise.

Tabela 20 - Fluxo de caixa descontado

n	Depreciação	Fluxo de caixa	Fluxo de caixa acumulado	Fluxo de caixa descontado	Fluxo de caixa descontado acumulado
0	\$8.080,00	\$-20.302,00	\$-20.302,00	\$-20.302,00	\$-20.302,00
1	\$7.272,00	\$15.505,67	\$-4.796,33	\$13.956,50	\$-6.345,50
2	\$6.544,80	\$15.505,67	\$10.709,34	\$26.518,61	\$20.173,11
3	\$5.890,32	\$15.505,67	\$26.215,02	\$37.825,63	\$57.998,74
4	\$5.301,29	\$15.505,67	\$41.720,69	\$48.002,98	\$106.001,72
5	\$4.771,16	\$15.505,67	\$57.226,36	\$57.163,50	\$163.165,22
6	\$4.294,04	\$15.505,67	\$72.732,03	\$65.408,79	\$228.574,01
7	\$3.864,64	\$15.505,67	\$88.237,70	\$72.830,30	\$301.404,31
8	\$3.478,18	\$15.505,67	\$103.743,38	\$79.510,33	\$380.914,64
9	\$3.130,36	\$15.505,67	\$119.249,05	\$85.522,95	\$466.437,60
10	\$2.817,32	\$18.322,99	\$137.572,04	\$107.457,37	\$573.894,97
		\$137.572,04		\$573.894,97	

* Cotação média do dólar em junho de 2023 foi de R\$ 4,95/US\$.

Fonte: Autor (2023).

Após a elaboração do fluxo de caixa, foram determinados os valores do Valor Presente Líquido (VPL), da Taxa Interna de Retorno (TIR) e do período de retorno (*Payback*), conforme apresentado na seção 3.2.4, resultando na Tabela 21.

Tabela 21 - Valores VPL, TIR e *Payback*

Ferramenta financeira	Valores
VPL	\$284.226,79
TIR	76%
<i>Payback</i> descontado	< 15 meses
Indicador benefício/custo (IBC)	4,3

* Cotação média do dólar em junho de 2023 foi de R\$ 4,95/US\$.

Fonte: Autor (2023).

Um Valor Presente Líquido (VPL) positivo sinaliza uma taxa de retorno que excede a taxa mínima de atratividade, validando a viabilidade econômica do investimento. A Taxa Interna de Retorno (TIR) de 76% evidencia a elevada rentabilidade do empreendimento. O período de recuperação do investimento inicial (*payback*) inferior a 15 meses revela uma rápida recuperação dos recursos

aplicados. Adicionalmente, os indicadores de Benefício-Custo (IBC) apontam para a criação de valor para o investidor.

4.3.7. Quantificação da geração de carbono equivalente

Os resultados revelaram uma pegada de carbono variando de 0,7 a 1,13 toneladas de CO₂ equivalentes, considerando um consumo anual de 13.832 kWh de eletricidade no processo (Tabela 22). Essas emissões podem ser compensadas por investimentos em projetos ecológicos, promovendo tecnologias limpas, qualidade de vida e gestão sustentável.

Tabela 22 – Estimativa de geração de carbono equivalente

Estimativa de consumo anual de eletricidade no processo	Fator de conversão de eletricidade específico para o Brasil	Geração de carbono equivalente
13.832 kWh	0,0814 kgCO ₂ eq /kWh	0,7 a 1,13 toneladas de CO ₂ equivalentes

Fonte: Autor (2023).

4.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

A alternativa proposta, que envolve a instalação de uma resistência elétrica sob a placa de alumínio para o aquecimento rápido em sistemas de secagem, demonstra ser tanto tecnicamente viável quanto economicamente vantajosa. A montagem e os testes do sistema experimental confirmaram, por meio de leituras termográficas, uma distribuição uniforme de calor.

O tempo necessário para elevar a temperatura da superfície da placa de alumínio de 25 °C para 70 °C, utilizando o sistema de aquecimento por resistência elétrica, foi de 390 segundos, com um consumo elétrico de 0,230 kWh. Após manter o sistema aquecido próximo a 70 °C por 4 horas, o consumo elétrico totalizou 1,2 kWh, resultando em uma eficiência energética de 52,5%.

A estratégia de incorporar a geração distribuída de energia solar fotovoltaica ao processo de secagem de alimentos surge como uma solução valiosa para famílias que residem em pequenas propriedades em áreas áridas e semiáridas. Com uma irradiação solar diária média de 5,59 kWh /m² e uma

demanda mensal de 1.140 kWh de energia elétrica, o investimento necessário para implementar um sistema de energia solar é de aproximadamente \$ 12.222,00, com um período de recuperação de cerca de 4,3 anos.

Os custos de produção foram cuidadosamente analisados, resultando em um custo médio de US\$ 11,02 por quilo de banana desidratada. O novo sistema de aquecimento demonstrou ser economicamente viável, com um rápido retorno do capital inicial em menos de 15 meses, gerando valor para o investidor. Além disso, houve uma redução significativa das emissões de carbono, que caíram para valores entre 0,7 e 1,13 toneladas de CO₂ equivalente.

Portanto, o novo equipamento de secagem com resistência elétrica e suporte fotovoltaico mostra-se potencialmente promissor.

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa buscou uma análise aprofundada, considerando aspectos tecnológicos e econômicos, com o intuito de aprimorar a eficiência energética de um secador de pequena escala, com foco especial no pequeno produtor, mediante a integração de fontes de energia renovável.

Inicialmente, realizou-se uma revisão da literatura a fim de selecionar um secador de alimentos para identificar áreas passíveis de melhorias em termos energéticos e econômicos. Notou-se que diversos estudos se dedicaram a investigar variações nas condições de secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo em diversas amostras, incluindo análises físico-químicas, reológicas e sensoriais. No entanto, uma notável lacuna foi identificada na avaliação dos custos de produção, viabilidade econômica e impactos ambientais. Tais análises desempenham um papel fundamental no respaldo de produtores, investidores e formulação de políticas públicas em relação a novas tecnologias, sobretudo quando os dados técnicos disponíveis são limitados.

Em seguida, procedeu-se a uma análise energética do equipamento de secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo previamente validado. Com uma eficiência energética de 53,6%, o consumo diário de energia para duas operações totalizou 134,8 kWh, equivalendo a 49.067 kWh anuais, com um custo médio de produção de US\$ 18,29 por quilo de banana desidratada. Os resultados da pesquisa demonstraram uma alta viabilidade econômica, caracterizada por um período de recuperação do capital inicial inferior a 17 meses e indicadores de Benefício-Custo favoráveis. O controle de temperatura usando um dado volume de água quente tem grande inercia térmica e permite controle de temperatura muito preciso. No entanto, é importante salientar que essa abordagem pode não ser vantajosa para pequenos produtores que operam em lotes e com produções menores, devido a desafios como o tempo necessário para aquecimento, tamanho do secador, formação de incrustações nas tubulações, necessidade de limpeza, elevadas perdas energéticas nas tubulações e troca térmica durante a noite. A análise ambiental revelou ainda uma pegada de carbono variando entre 2,48 e 3,99 toneladas de CO₂ equivalente por ano.

Posteriormente, foi concebido um novo sistema de aquecimento com base nos resultados experimentais obtidos com o aquecedor de coletor solar. Esse sistema envolveu a utilização de resistências elétricas posicionadas diretamente sob a bandeja de secagem, com o suporte da energia fotovoltaica. O tempo necessário para elevar a temperatura da superfície da placa de alumínio de 25°C para 70°C, empregando o sistema de aquecimento por resistência elétrica, totalizou 390 segundos, com um consumo elétrico de 230 Wh. Assim ao fornecer 1,2 kWh para atender a uma demanda de 0,63 kWh, a eficiência energética do sistema alcançou 52,5%, resultando em uma redução nos custos de produção para \$11,02 por quilo. Para viabilizar esse sistema, foi dimensionado um sistema fotovoltaico de 8,5 kWp, composto por 22 módulos de 390 W, requerendo um investimento aproximado de \$12.222,00 e apresentando um período de recuperação de 4,3 anos. A vantagem do aquecimento elétrico direto é o menor custo de construção e o aquecimento rápido do sistema.

A estratégia de incorporar a geração distribuída de energia solar fotovoltaica ao processo de secagem de alimentos emerge como uma solução valiosa, especialmente para famílias que residem em pequenas propriedades em áreas áridas e semiáridas. O novo sistema de aquecimento revelou-se economicamente viável, proporcionando um retorno rápido do capital inicial em menos de 15 meses, gerando valor para o investidor. Além disso, houve uma significativa redução nas emissões de carbono, que oscilaram entre 0,7 e 1,13 toneladas de CO₂ equivalente.

Assim, foi confirmada a hipótese de que é possível aprimorar a eficiência energética de um secador de pequena escala, resultando na redução dos custos operacionais e dos impactos ambientais. O uso de energias renováveis em secadores de pequena escala demonstra ser tanto economicamente quanto tecnologicamente viável, contribuindo para a promoção de uma produção mais sustentável e eficiente.

Sugestões para trabalhos futuros:

- a) Modelagem e otimização do sistema de ciclo de secagem por aquecimento-pulso de vácuo;
- b) Estudar o sistema de ciclo de secagem por aquecimento-pulso de vácuo em outras frutas e hortaliças e em diferentes regiões;
- c) Investigar a integração de diferentes fontes de energia renovável, como biomassa e energia solar, para diversificar e otimizar a matriz energética dos secadores;
- d) Investigar tecnologias avançadas de controle e monitoramento para otimizar a operação dos secadores e garantir o uso eficiente da energia;
- e) Estudo do acoplamento e distribuição do sistema de vácuo para ganho de escala;
- f) Estudo e montagem de secadores CAPV verticais e acompanhamento da eficiência do sistema de aquecimento; e
- g) Realizar uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) abrangente para avaliar o impacto ambiental ao longo do ciclo de vida dos secadores, incluindo a produção, operação e disposição final.

REFERÊNCIAS

- ABDELOUAHAB BENSEDDIK et al. Effect of drying processes on the final quality of potimarron pumpkin (*Cucurbita maxima*) powders. **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 43, n. 1, p. 136–146, 23 set. 2020.
- ALEXANDER, Charles K. & SADIKU, Matthew N. O.. Fundamentos de Circuitos Elétricos; 2ª ed.; trad. Gustavo Guimarães Parma. - Porto Alegre: Bookman, 2003.
- ALLAF, T.; ALLAF, K. (EDS.). **Instant Controlled Pressure Drop (D.I.C.) in Food Processing**. New York, NY: Springer New York, 2014.
- ANDREANI, Pamela. **Medidas Simultâneas Mecânicas e Acústicas e Correlações Sensoriais para Alimentos Crocantes**. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Florianópolis, 197 p. 2018.
- AQSpP. **Utilização de Colectores Solares para Aquecimento de Água no Sector Doméstico**. Lisboa, Abril de 2004. ISBN 972-8268-29-7. Disponível em: <www.aguaquentesolar.com> Acesso em: março de 2022.
- AUGUSTUS LEON, M.; KUMAR, S.; BHATTACHARYA, S. C. A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, n. 4, p. 367–393, ago. 2002.
- AVALLONE, Elson. **Estudo de um coletor solar, tipo tubo evacuado modificado, utilizando um concentrador cilíndrico parabólico (CPC)**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da UNESP - Câmpus de Bauru. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 191 f., 2017.
- BANDEIRA, F. de P. M. Aproveitamento da energia solar no Brasil: Aproveitamento e perspectivas. **Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados**. Consultoria Legislativa. Brasília - DF. Março 2012. Disponível em: http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/9008/aproveitamento_energia_bandeira.pdf?sequence. Acesso em: 23 Jan 2020.
- BARBOSA, Lucas de Souza; MACEDO, Jessica Lorena; SANTOS, Camilla Mendes dos; MACHADO, Antônio Vitor. Estudo da Secagem de Frutos Tropicais do Nordeste. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**. Revista Verde (Mossoró – RN), v. 9, n.1, p.186-190, jan-mar, 2014.
- BEZERRA, Francisco Diniz. Energia Solar. Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste – ETENE. **Caderno Setorial**. Ano 6, Nº 174, Julho, 2021.
- Bezerra Filho, C. R., Laurent, M., & Raynaud, M. **A Resistência Térmica de Contato**. In CONEM 2000 - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Natal, RN, Brasil, 2000.

BOHRINGER, C. **The Kyoto Protocol: A Review and Perspectives**. Oxford Review of Economic Policy, v. 19, n. 3, p. 451-466, 2003. Disponível em: <https://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp0361.pdf> Acesso em: 10 junho 2023.

BRENNAN, James G. **Food Processing Handbook**. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim, Germany, 2006.

ACAR, C.; DINCER, I.; MUJUMDAR, A. A comprehensive review of recent advances in renewable-based drying technologies for a sustainable future. **Drying Technology**, p. 1–27, 26 nov. 2020.

CEMIG. Companhia Energética de Minas Gerais. **Revista P&D**. Pesquisa e desenvolvimento tecnológico. Informativo do Programa de Gestão Estratégica de Tecnologia da Cemig e dos Projetos de P&D Aneel. Número 11. 2015.

CEPLAC. Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira. **Banana**. Disponível em: <<http://www.ceplac.gov.br/radar/banana.htm>>. Acesso: em 15 março de 2020.

CHEN, Xiao Dong e MUJUMDAR, Arun S. **Drying Technologies in Food Processing**. INBUNDEN, Engelska, 2008.

ÇENGEL, Y.A. Transferência de Calor e Massa – Uma abordagem prática, Mc. Graw Hill, São Paulo, 3ª ed., 2009.

EI BASSAM, N., MAEGAARD, P., & SCHLICHTING, M. L. **Solar Energy**. Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities, 91–109. 2013.

FAO no Brasil. Estudo inédito da FAO aponta que a biodiversidade do planeta está desaparecendo. Disponível em: <<https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/fr/c/1181587/>> Acesso em: 25 out. 2023.

FELLOWS, P. (2000). **Food Processing Technology: Principles and Practice**. 2nd ed. ISBN1855735334. 650 Pages. Woodhead Publishing Ltd. Mai 16, 2000.

FIRJAN (2017). **Quanto custa a energia elétrica para a pequena e média indústria no Brasil?** Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-economia/quanto-custa-a-energia-eletrica.htm>. Acesso em: 12 set. 2022.

HASAN, M. U. et al. Modern drying techniques in fruits and vegetables to overcome postharvest losses: A review. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 43, n. 12, 30 out. 2019.

HSU, H.-W. et al. Energy, economic and environmental (3E) analysis for the renewable jet fuel production process. *Sustainable Production and Consumption*, v. 33, p. 146–157, set. 2022.

IDEAL. **O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída Fotovoltaica Edição 2019**. Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina. Disponível em:

https://issuu.com/idealeco_logicas/docs/o_mercado_brasileiro_de_gera_o_distribu_da_fv_-_e. Acesso em: julho de 2021.

KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering: Processes and systems**. San Diego, CA, USA: Academic Press, 2013.

KARIM, M. A.; HAWLADER, M. N. A. Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation. **Journal of food engineering**, v. 70, n. 1, p. 35–45, 2005.

KEMP, I. C. Reducing dryer energy use by process integration and pinch analysis. **Drying technology**, v. 23, n. 9–11, p. 2089–2104, 2005.

KEMP, I. C. **Fundamentals of energy analysis of dryers**. **Modern Drying Technology** Wiley, 16 nov. 2011.

KRATZENBERG, M. G. **Método para avaliação de incertezas de ensaios de coletores solares baseados nas normas EN12975 e ISO9806**. Dissertação (Mestre em Metrologia) - Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial. Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

KUDRA, T. Energy aspects in drying. **Drying technology**, v. 22, n. 5, p. 917–932, 2004.

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. **Advanced Drying Technologies, Second Edition**. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2009.

KUMAR, M.; SANSANIWAL, S. K.; KHATAK, P. Progress in solar dryers for drying various commodities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 346–360, 2016.

LACCHINI, Corrado. **Análise econômica de sistemas fotovoltaicos residenciais no contexto brasileiro, com foco nos indicadores financeiros e nas tarifas locais de energia elétrica**. TESE (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

LANGFORD, A. et al. Drying technologies for biopharmaceutical applications: Recent developments and future direction. **Drying technology**, v. 36, n. 6, p. 677–684, 2018.

LAURINDO, J.B., PORCIUNCULA, B.D.A.; ZOTARELLI, M.F. Processo de secagem por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV) para obtenção de alimentos desidratados crocantes. **Brazilian Patent** PI 017110000045, 2011.

LI, X.; XU, F.; JING, K. Robust enhanced indexation with ESG: An empirical study in the Chinese Stock Market. **Economic modelling**, v. 107, n. 105711, p. 105711, 2022.

LING, A. et al. When trackers are aware of ESG: Do ESG ratings matter to tracking error portfolio performance? **Economic modelling**, v. 125, n. 106346, p. 106346, 2023.

LINK, J. V.; TRIBUZI, G.; LAURINDO, J. B. Conductive multi-flash drying of mango slices: Vacuum pulse conditions on drying rate and product properties. **Journal of food processing and preservation**, v. 42, n. 2, p. e13440, 2017a.

LINK, J. V.; TRIBUZI, G.; LAURINDO, J. B. Improving quality of dried fruits: A comparison between conductive multi-flash and traditional drying methods. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie [Food science and technology]**, v. 84, p. 717–725, 2017b.

LINK, J. V. et al. Assessment of texture and storage conditions of mangoes slices dried by a conductive multi-flash process. **Journal of food engineering**, v. 239, p. 8–14, 2018.

LINK, J. V. **Aplicação de múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo para a produção de fatias de manga** (Mangífera indica L.) desidratadas. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

LOUKA, N.; ALLAF, K. New process for texturizing partially dehydrated biological products using Controlled Sudden Decompression to the vacuum: Application on potatoes. **Journal of food science**, v. 67, n. 8, p. 3033–3038, 2002.

MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**. v.29, p.75-97, 2007.

MANEA, T.F. **Desenvolvimento de Uma Bancada de Ensaio de Coletores Solares de Tubos de Vidro a Vácuo**. Dissertação (Mestre em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFRGS, Porto Alegre RS, 2012.

MARTINS, F. P. et al. Secagem: uma revisão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 6, n. 4, p. 0600–0607i, 2020.

MEDINA, V. M.; PEREIRA, M. E. C. **Banana**, Capítulo XII: Pós Colheita, 2004, Disponível em:
http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/Livro_Banana_Cap_12ID-ZU0HVGp1W7.pdf. Acesso em: 11 de janeiro de 2020.

MENON, A.; STOJCESKA, V.; TASSOU, S. A. A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. **Trends in food science & technology**, v. 100, p. 67–76, 2020.

MONTEIRO, R. L.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas. **Journal of food engineering**, v. 178, p. 1–11, 2016.

MONTEIRO, R. L. et al. How to make a microwave vacuum dryer with turntable. **Journal of food engineering**, v. 166, p. 276–284, 2015.

MONTEIRO, R. L. et al. Evolution of the physicochemical properties of oil-free sweet potato chips during microwave vacuum drying. **Innovative food science & emerging technologies: IFSET: the official scientific journal of the European Federation of Food Science and Technology**, v. 63, n. 102317, p. 102317, 2020.

MONTEIRO, R. L. et al. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices. **Journal of food engineering**, v. 232, p. 1–10, 2018a.

MONTEIRO, R. L. et al. Effect of multi-flash drying and microwave vacuum drying on the microstructure and texture of pumpkin slices. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie [Food science and technology]**, v. 96, p. 612–619, 2018b.

MONTEIRO, R. L. **Secagem de banana (var. prata) em campo de micro-ondas com vácuo contínuo ou intermitente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 136p., 2014.

MORRISON, G. L., BUDIHARDJO, I., & BEHNIA, M. Water-in-glass evacuated tube solar water heaters. **Solar Energy**, 76(1-3), 135–140, 2004.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. CRC Press, 2006.

OETJEN, G.-W.; HASELEY, P. **Freeze-drying**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2004.

OIKONOMOPOULOU, V. P.; KROKIDA, M. K.; KARATHANOS, V. T. The influence of freeze drying conditions on microstructural changes of food products. **Procedia food science**, v. 1, p. 647–654, 2011.

ONU. **FAO combate desperdício de frutas e hortaliças**, 2022. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/201527-fao-combate-desperd%C3%ADcio-de-frutas-e-hortali%C3%A7as>> Acesso em: 7 de novembro de 2023.

ONWUDE, D. I. et al. Non-thermal hybrid drying of fruits and vegetables: A review of current technologies. **Innovative food science & emerging technologies: IFSET: the official scientific journal of the European Federation of Food Science and Technology**, v. 43, p. 223–238, 2017.

PÁSTOR, L.; STAMBAUGH, R. F.; TAYLOR, L. A. Dissecting green returns. **Journal of financial economics**, v. 146, n. 2, p. 403–424, 2022.

PAYNE, F. A.; TARABA, J. L.; SAPUTRA, D. A review of puffing processes for expansion of biological products. **Journal of food engineering**, v. 10, n. 3, p. 183–197, 1989.

PEDERSEN, L. H.; FITZGIBBONS, S.; POMORSKI, L. Responsible investing: The ESG-efficient frontier. **Journal of financial economics**, v. 142, n. 2, p. 572–597, 2021.

PEREIRA, E. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. Universidade Federal de São Paulo, 2017.

PINHO, J. T., e GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CEPEL – CRESESB. Rio de Janeiro, março, 2014.

PORCIUNCULA, B. D. A. **Controle da microestrutura e textura na desidratação de banana usando ciclos de aquecimento-pulso de vácuo**. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

PORCIUNCULA, B. D. A.; SEGURA, L. A.; LAURINDO, J. B. Processes for controlling the structure and texture of dehydrated banana. **Drying technology**, v. 34, n. 2, p. 167–176, 2015.

PORCIUNCULA, B. D. A. **Desenvolvimento de processo integrado de desidratação e modificação da textura de banana (var. prata) por secagem convectiva e pulsos de vácuo**. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

PRADO, R. T. A. et al. **Levantamento do estado da arte: Energia Solar**. Projeto Finep 2386/04. São Paulo. 2007.

QUERIDO, A.F. **Estudo da influência de técnicas na minimização da incorporação de óleo durante o processo de fritura de maçã**. 219 p. Dissertação (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

RAHMAN, M. **Food Properties Handbook**. [s.l.] CRC Press, 2009.

RAHMAN, M. S. (ED.). **Handbook of food preservation**. [s.l.] CRC Press, 2007.

RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. **Journal of food engineering**, v. 49, n. 4, p. 311–319, 2001.

REN ANEEL 1.059/2023. **Resolução normativa ANEEL nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>. Acesso em: Maio 2023.

REN21. **Renewable Energy Policy Network for the 21st Century**. Why is renewable energy important? Disponível em: <https://www.ren21.net/why-is-renewable-energy-important/> Acesso em: 05/02/2020.

RENNIE, T. J. **Effects of vacuum rate on the vacuum cooling of lettuce**. Department of Agricultural and Biosystems Engineering. Faculty of Graduate Studies and Research, McGill University, Montreal, November 1999.

ROOHINEJAD, S. et al. Energy saving food processing. Em: **Sustainable Food Systems from Agriculture to Industry**. [s.l.] Elsevier, 2018. p. 191–243.

RORATTO, T. B. et al. An innovative hybrid-solar-vacuum dryer to produce high-quality dried fruits and vegetables. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie [Food science and technology]**, v. 140, n. 110777, p. 110777, 2021.

RORATTO, T. B. **Desenvolvimento de um secador solar híbrido operando a vácuo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

ROSA, F. N.; MANEA, T.; KRENZINGER, A. O estudo comparativo da utilização de coletores solares planos e tubulares para aquecimento de água. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 2, p. 93–100, 2013.

ROSA, F. N. DA. **Aplicabilidade de coletores solares com tubo evacuado no Brasil**. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

RÜTHER, R. The Role of Grid-Connected, Building-Integrated Photovoltaic Generation in Commercial Building Energy and Power Loads in a Warm and Sunny Climate. **Energy Conversion and Management**, v. 51, 2457–2466, ELSEVIER, 2010.

SACA, S.A.; LOZANO, J.E. Explosion puffing of bananas. **International journal of food science & technology**, v. 27, n. 4, p. 419-426, 1992.

SAGAR, V. R.; SURESH KUMAR, P. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. **Journal of food science and technology**, v. 47, n. 1, p. 15–26, 2010.

SARAVACOS, G.; KOSTAROPOULOS, A. E. Food Dehydration Equipment. Em: **Food Engineering Series**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 367–419.

SARAVACOS, G.; KOSTAROPOULOS, A. E. **Handbook of food processing equipment**. Cham: Springer International Publishing, 2016.

SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Estudo de Mercado. Banana relatório completo**, 2008. Disponível em: [https://bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/8E2336FF6093AD96832574DC0045023C/\\$File/NT0003904A.pdf](https://bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/8E2336FF6093AD96832574DC0045023C/$File/NT0003904A.pdf). Acesso em: maio de 2020.

SINGH, R.P.; HELDMAN, D.R. **Introduction to Food Engineering**. 4 ed., San Diego: Academic Press, 2009.

SOUSA, P. H. M.; SOUSA FILHO, M. S. M.; MAIA, G. A.; FIGUEIREDO, R. W.; SOUZA NETO, M. A.; CARVALHO, J. M. Avaliação das curvas de secagem e da alteração de cor e textura da banana processada por desidratação osmótica seguida de secagem, **Revista Ciência Agronômica**, v.34, p. 179-185, 2003.

STRUMIŁŁO, C.; JONES, P. L.; ZYŁŁA, R. Energy aspects in drying. Em: **Handbook of Industrial Drying**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2014. p. 1077–1100.

SULLIVAN, J.F.; CRAIG, J.C.JR. The development of explosion puffing. **Food Technology**, v.38, p. 52-58, 1984.

TACO. **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos**. 4.ed.rev.ampl. Campinas: NEPA-UNICAMP, 2011. 161p. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/legislacao-de-produtos-origem-vegetal/biblioteca-de-normas-vinhos-e-bebidas/tabela-brasileira-de-composicao-de-alimentos_taco_2011.pdf

THIRUGNANASAMBANDAM, M.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar thermal technologies. **Renewable and sustainable energy reviews**, v.14, n.1, p.312-322, 2010.

TOREZAN, G. A. P. **Desenvolvimento do processo combinado de desidratação osmótica-fritura para obtenção de chips de manga**. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. Campinas, SP: [s.n.], 2005.

TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. Photovoltaic/thermal solar collectors. *Compr. Renew. Energy* 255 e 300. 2012.

VARNALIS, A. I.; BRENNAN, J. G.; MACDOUGALL, D. B. A proposed mechanism oh high-temperature puffing of potato. Part I. The influence of blanching and drying conditions on the volume of puffed cubes. **Journal of Food Engineering**, v. 48, p. 361–367, 2001.

VILLALVA, M. **Energia Solar fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 1 ed. São Paulo: Érica, 2012.

WANG, L. Energy efficiency technologies for sustainable food processing. **Energy efficiency**, v. 7, n. 5, p. 791–810, 2014.

WANG, L.; SUN, D.-W. Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology. **Trends in food science & technology**, v. 12, n. 5–6, p. 174–184, 2001.

ZOTARELLI, M. F. **Desenvolvimento de processo combinado de desidratação e modificação de textura de manga por secagem convectiva e pulso de vácuo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

ZOTARELLI, M. F.; PORCIUNCULA, B. D. A.; LAURINDO, J. B. A convective multi-flash drying process for producing dehydrated crispy fruits. **Journal of food engineering**, v. 108, n. 4, p. 523–531, 2012.

APÊNDICE A - Investigação da relação entre a massa da banana e a quantidade de energia elétrica consumida durante o processo

O presente estudo visou a avaliação do desempenho de um dispositivo experimental concebido para o processo de desidratação com emprego de aquecimento elétrico, bem como a investigação da relação entre a massa da banana e a quantidade de energia elétrica consumida durante o processo.

O experimento foi conduzido em um ambiente controlado de laboratório, mantido a uma temperatura constante de 23 °C por meio de um sistema de ar-condicionado. Para tanto, utilizou-se uma massa inicial de 1024 g de bananas descascadas e fatiadas, caracterizadas por apresentarem uma umidade média de 75%. Estas foram devidamente acomodadas sobre folhas antiaderentes de grau alimentício, fabricadas em Politetrafluoroetileno (PTFE), escolhidas devido à sua resistência a altas temperaturas.

Foi efetuado o registro da variação temporal da temperatura por meio de um Multímetro Digital TRUE-RMS, modelo POL-41A, equipado com sensor de temperatura do tipo K (termopar). Para o Experimento 3, foi estrategicamente posicionado no ponto central da superfície da chapa de alumínio do dispositivo experimental, garantindo contato direto. Para o Experimento 4, foi colocado no centro de uma fatia de banana disposta no ponto central do equipamento, permitindo a monitorização precisa da temperatura em ambas as áreas de interesse durante o experimento.

Para a mensuração do consumo energético dos componentes elétricos integrantes do sistema de secagem, utilizou-se um medidor de consumo de energia elétrica CA multifuncional monofásico. Estes dispositivos são capazes de registrar a tensão instantânea (variando de 110V a 250V CA), a corrente instantânea (variando de 0 a 100 A), a potência instantânea (variando de 0 a 22.000 W) e a energia consumida (variando de 0 a 999,99 kWh). Os pontos designados para a coleta e registro dos dados referentes ao consumo energético em um sistema de tensão monofásica foram as saídas destinadas à alimentação da resistência elétrica, operando com potência de 1800 W e a uma voltagem de 220 V.

É relevante destacar que o sistema em questão possui um revestimento externo constituído por uma manta fabricada a partir de fibra de cerâmica, reconhecida por oferecer um isolamento térmico eficiente. A presença de uma

cobertura superior em vidro no sistema de secagem minimiza as perdas de calor devido à convecção e radiação. Entretanto, para os propósitos experimentais deste estudo, a tampa foi removida para facilitar a observação, resultando em uma troca térmica com a parte superior do ambiente.

Resultado do experimento 3 – Aquecimento sem a banana

O período requerido para elevar a temperatura da superfície da placa de alumínio de 42 °C para 70 °C, utilizando o sistema de aquecimento por resistência elétrica, foi aproximadamente de 340 segundos, acompanhado de um consumo elétrico de 0,275 Wh. Após manter o sistema aquecido próximo de 70 °C por 4 horas, o consumo elétrico totalizou 1,219 kWh.

Resultado do experimento 4 – Aquecimento com a banana

No experimento 4, o período requerido para elevar a temperatura da fatia de banana de 27 °C para 70 °C, com a superfície da placa de alumínio inicialmente em 38°C, utilizando o sistema de aquecimento por resistência elétrica, foi de 857 segundos, acompanhado de um consumo elétrico de 0,424 kWh. Após manter o sistema aquecido próximo de 70 °C por 4 horas, o consumo elétrico totalizou 1,403 kWh.

Conclusão

Portanto, observou-se um aumento percentual no consumo de energia de cerca de 15% entre o terceiro e o quarto experimento. É importante destacar que, para o experimento descrito no Capítulo 4, uma perda de 20% foi considerada para manter o equipamento aquecido durante todo o processo. Assim, pode-se concluir que o valor adicional constatado no experimento adicional, destinado à investigação da relação entre a massa da banana e a quantidade de energia elétrica consumida, foi devidamente incorporado e validado nos cálculos realizados.