VETOR

Modelagem Computacional Contribuindo para Desenvolvimento da Agricultura Cacaueira☆

Computational Modelling Contributing to the Development of Cocoa Agriculture

Jorge Henrique Sales†, Francisco Bruno S. Oliveira, Gesil S. Amarante-Segundo, Gildson Q. de Jesus, Everton C. Santos, Luiz Vinicius de M. Soglia, Rafaela Cristina F. Brito

Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, BA, Brasil
†**Autor correspondente:** jhosales@uesc.br

Resumo

Este artigo apresenta três projetos desenvolvidos no Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia (PPGMC-UESC) que resultaram em dissertações. Os projetos decorrem da dedicação e do aperfeiçoamento profissional que trazem para a sociedade alternativas tecnológicas para serem aplicadas na agricultura do cacau. O primeiro projeto propõe uma tecnologia para secagem de grãos de amêndoas utilizando energia solar. Neste primeiro projeto, descrevemos uma estufa vertical preenchida com bandejas sobrepostas ao longo de sua altura; as bandejas contêm uma camada de amêndoas frescas. O segundo projeto apresenta um sistema que capta a energia solar através de uma série de coletores parabólicos, convertendo luz em energia térmica e um fluido de trabalho transfere o calor para um tanque de armazenamento de energia térmica. A energia acumulada de um recipiente de sal é usada para aquecer a corrente de ar durante a noite, secando as sementes de cacau uniformemente. O terceiro projeto investiga os fatores que influenciam a produção de biogás gerado em um biodigestor para a produção de energia elétrica em uma fazenda de cacau. Estes projetos contribuem com tecnologias alternativas aplicáveis na produção de cacau na região Sul da Bahia e ajudam os produtores a aumentar seus conhecimentos em favor de uma produção de qualidade e competitiva, demonstrando assim o impacto social do programa acadêmico para a sociedade.

Palavras-chave

Modelagem computacional • Beneficiamento de cacau • Biogás • Energia solar

☆Este artigo é uma versão do trabalho apresentado no Evento "Ações dos PPGs da Área Interdisciplinar: Impactos na Sociedade", realizado em Santo Antônio da Patrulha-RS, de 6 a 8 de abril de 2022.

Abstract

This article presents three projects that resulted in dissertations after much research within the Graduate Program in Computational Modelling in Science and Technology (PPGMC-UESC). The projects come from dedication and professional improvement that bring society the viability of technological alternatives to be applied in cocoa agriculture. The first project proposes a technology for drying almonds grain using solar energy. This project describes a vertical greenhouse filled with overlapped trays containing fresh almonds. The second project presents a system that captures solar energy through parabolic collectors, converting light into heat. A working fluid transfers the heat to a thermal energy storage tank with salt. The accumulated energy from a salt container is used to heat the airstream overnight, drying the cocoa beans uniformly. The third project investigates the factors that influence the output of biogas generated in a biodigester for electric energy production on a cocoa farm. These projects contribute with technologies applicable to cocoa production in the South of Bahia region and help producers increase their knowledge in favor of quality and competitive production, thus demonstrating the social impact of the academic program on society.

Keywords

Computational modelling • Cocoa processing • Biogas • Solar energy

1 Introdução

A cultura do cacau no território brasileiro teve seu prelúdio durante o período imperial, e desde lá tem passada por ciclos de alta produtividade, como também fortes decadências. Uma delas ocorreu devido à vassoura-de-bruxa que reduziu drasticamente a produção da amêndoa e sua qualidade e como decorrência deste fatídico momento na história da cultura do cacau, deixou inúmeros prejuízos para as lavouras de cacau.

Após superar esta decadência, a cultura do cacau representa uma atividade agrícola relevante na economia dos municípios do Sul da Bahia, transformando o Estado num dos maiores produtores de cacau do país [1]. A influência da Bahia e também da cidade de Ilhéus na cacauicultora é notada pois o Estado da Bahia é responsável por toda produção de cacau do Nordeste e por 42% da produção total brasileira [2]. No Parque Industrial de Ilhéus são processadas diariamente 450 ton de amêndoas secas de cacau, que geram 45 ton de farelo.

Com o aumento da demanda de cacau, houve a necessidade de se introduzir tecnologias para que desse suporte ao manejo. A UESC, com seus cursos avançados de pós-graduação, veio atender esta demanda, utilizando as pesquisas avançadas e análises pontuais, propiciando a entrada de novas tecnologias para a produção agrícola de cacau. Surge, assim, a proposta de mecanização para a pós-colheita de cacau, que consiste em procedimentos automáticos da fermentação, secagem e a interligação contínua e automática entre os processos, além de produção energética.

No direcionamento do suporte científico para a produção de cacau, houve um aumento de interesse dos alunos para desenvolver seus trabalhos científicos neste ramo agrícola. Os sistemas que são mostrados neste artigo visam interligar e melhorar os equipamentos da fermentação e secagem, que já estão consolidados no mercado, mas estão com as etapas separadas e independentes das demais atividades.

Diante do alto custo da produção, baixo rendimento do trabalho e a escassez crescente da mão de obra, a automação vem se tornando uma necessidade no sentido de aumentar o rendimento, a qualidade do cacau e melhor aproveitamento dos subprodutos (mel do cacau, polpa e casca), contribuindo para o aumento da renda [3,4].

Embora já existam iniciativas de mecanização viáveis no manuseio do cacau de posse dos grandes produtores, estas não atingem todas as etapas do processamento interligadas da produção, além de não permitir a obtenção de subprodutos.

Atualmente, a produção de cacau da região Sul da Bahia, predominantemente de pequenos e médios produtores, tem enfrentado dificuldades na obtenção de mão de obra para o processamento da pós-colheita.

Na pós-colheita em uma fazenda de cacau, os custos com a mão de obra chegaram a R$ 20,36/@ do cacau seco. A arroba, representada pelo símbolo @, é uma unidade de massa usada no agronegócio, e corresponde a aproximadamente 12 kg. O valor médio da arroba de cacau dos últimos anos é de cerca de R$70,00/@. O custo da operação da pós-colheita atinge aproximadamente 30% do valor de venda. Inovação do processamento da pós-colheita do cacau se faz necessária para alavancar a escala de produção de cacau no Brasil, pois sem inovação o aumento de escala trará aumento do custo de produção.

Na área de produção de energia, no último trimestre de 2019, a microrregião de Ilhéus-Itabuna registrou uma evolução da demanda de energia em suas atividades econômicas em comparação com o ano anterior, ocorrendo um incremento de 12,8% para o setor de comércio e serviços, no município de Ilhéus, e 7,8% para o munícipio de Itabuna, no mesmo setor. Dados revelam que, apesar do cenário adverso ao crescimento econômico, a demanda por energia continua crescendo e consolidando-se como uma área promissora para investimentos no que tange às formas alternativas de obtenção de energia elétrica ou gestão de energia [5].

Dentro desse contexto, a biomassa se apresenta como uma solução tecnológica de grande potencial gerador de energia, podendo ser utilizada em substituição aos combustíveis convencionais e na geração de energia elétrica.

Este artigo apresenta dois sistemas para secagem das amêndoas de cacau e um de geração de energia elétrica, todos desenvolvidos no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia (PPGMC-UESC). Os resultados produzidos em três dissertações, geraram um depósito de patente, uma patente concedida e artigos publicados.

2 Materiais e Métodos

Os projetos abrangem um conjunto de atividades interdisciplinares, por meio de competências profissionais dentro das áreas das ciências exatas (engenharia mecânica, eletrônica, de software e elétrica), matemática, física e processos industriais, tendo requerido a participação de especialistas para o logro destes projetos.

Diversos problemas de engenharia e física matemática (como transferência de calor, fluidodinâmica e análise estrutural) surgiram e foram modelados usando-se equações diferenciais ordinárias (EDOs) ou parciais (EDPs), como problemas de valor de contorno, possuindo soluções matemáticas analíticas difíceis (ou mesmo impossíveis) de serem determinadas, principalmente quando envolvem geometrias complexas, cargas e propriedades de materiais. O sistema de geração de energia utiliza esse método.

O método dos elementos finitos (*Finite Element Method* - FEM) é um método numérico que se baseia na discretização (subdivisão) de um corpo contínuo em um número finito de elementos (com as mesmas propriedades intensivas do corpo que os gerou). Os elementos estão interligados através de pontos nodais (ou nós), em que são definidos os graus de liberdade a serem determinados, formulando as equações para cada elemento finito. O conjunto de nós interligados é denominado malha. As simulações foram realizadas com ajuda do *software* COMSOL Multiphysics®. Os sistemas de secagem e o sistema auxiliar usam esse método. A validação consistiu na comparação dos resultados observados do protótipo experimental com os previstos pelos modelos computacionais.

3 Secador de Cacau Vertical

Este equipamento propõe uma tecnologia para secagem de grãos de cacau utilizando energia solar. Trata-se de um secador disposto verticalmente, preenchido por bandejas sobrepostas ao longo da sua altura, contendo inicialmente uma camada de amêndoas frescas [4]. O funcionamento do equipamento requer que se alimente o secador com cacau na bandeja superior, com as amêndoas ainda frescas, e periodicamente, por mecanismo de movimentação de bandejas de cima para baixo, e finalmente retirando a bandeja inferior contendo as amêndoas secas.

Com a utilização das tecnologias CAD/CAE, é obtida a geometria, discretização do domínio e simulações pelo método dos elementos finitos para avaliação da temperatura da barcaça e da torre proposta, ambas utilizadas para a secagem de amêndoas de cacau. A convecção tem expressiva importância na secagem, e com isso foi calculado o campo de velocidade no interior do protótipo.

Este secador vertical mostra significativos benefícios em relação à barcaça (um instrumento usual e cultural de secagem de amêndoas de cacau na região), proporcionando uma redução drástica da área necessária para secagem de amêndoas e melhores condições de trabalho. As simulações mostram também uma melhor eficiência de secagem, uma vez que a torre consegue manter por mais tempo o calor em seu interior, atingindo ainda temperaturas próximas de 50 ^{0}C, contra 36 ^{0}C atingidos na barcaça, considerando um mesmo intervalo de tempo de simulação e semelhantes condições iniciais e de contorno.

Primeiramente, apresentamos a definição geométrica de uma barcaça típica, a partir do uso de ferramenta de CAD/CAE, a discretização dos domínios relacionados, bem como a realização das simulações para a estimativa do campo de temperatura no sistema por Método dos Elementos Finitos. Após a etapa de fermentação das amêndoas, elas são secas pela exposição à radiação solar. As barcaças são os equipamentos tradicionalmente usados nesta etapa.

A estrutura possui lastro de madeira onde as amêndoas são acondicionadas, e a cobertura móvel de aço galvanizado. Nos horários de sol forte (das 10h às 14h) a cobertura deve ser fechada para que o cacau fique à sombra, possibilitando uma secagem homogênea. A Fig.1 mostra detalhes de uma barcaça típica.



Figura 1: Barcaça [4].

As barcaças têm dimensões de 3×3, 8×8 ou 6×12 m, e altura desde o solo de 1 m. O revolvimento é realizado com rodo de madeira para promover a secagem homogênea e evitar a aglomeração das amêndoas. Camadas de 3 a 6 cm de espessura de cacau são espalhadas sobre a barcaça, a depender do fluxo da colheita e condições climáticas. Isto equivale a uma carga que varia de 25 a 40 kg de cacau úmido por metro quadrado. Para a realização das simulações referentes à barcaça, foram considerados os materiais da Tabela 1 com suas respectivas propriedades físicas.

Tabela 1: Propriedades dos materiais para a simulação da barcaça

Propriedades	Madeira (Pinheiro) da barcaça	Concreto do piso
Capacidade Térmica (J/kg.K)	200	900
Massa Específica (kg/m^3)	930	2300
Condutividade Térmica (W/m.K)	0,13	1,8
Emissividade	0,50	0,95

Os resultados das simulações para a barcaça, usando os dados da Tabela 1, são apresentados na Fig. 2, que mostra a distribuição da temperatura sob o sistema barcaça em função do tempo. Estes resultados são fundamentais na comparação das respostas térmicas da torre e barcaça. Definidas as condições iniciais e de contorno para a barcaça, foi calculada numericamente a distribuição da temperatura na barcaça às 10:00, 12:00 e 14:00 horas como mostra a Fig. 2. A tolerância absoluta foi de 10^{-3}.

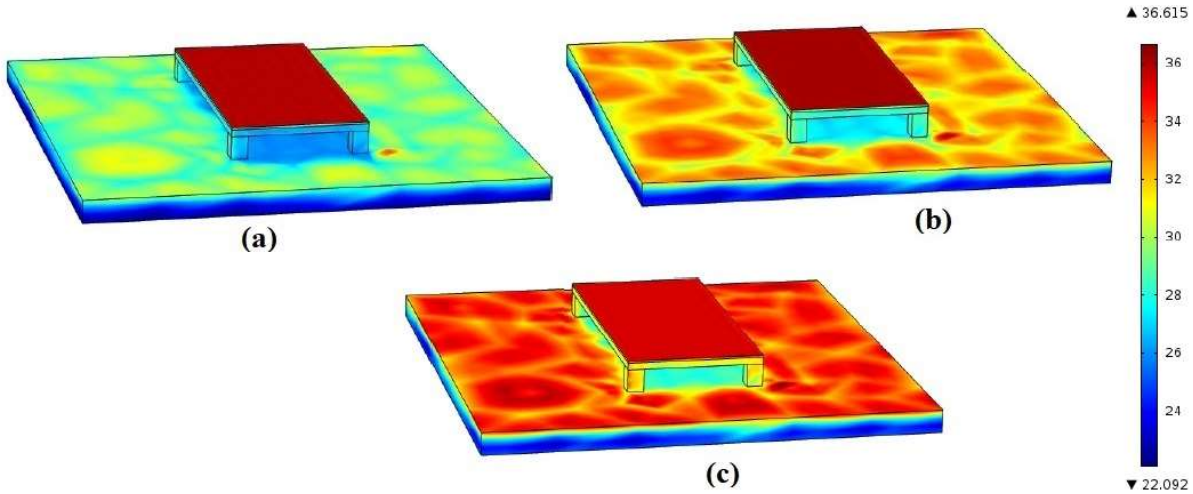

Figura 2: Temperaturas simuladas da barcaça, em graus Celsius. a) 10h00, b) 12h00 e c) 14h00 [4].

A Fig. 2 (a) mostra o campo de temperaturas obtido pela barcaça às 10h da manhã. Há um platô de temperatura de 36 ^{0}C na região onde as amêndoas são espalhadas, mostrando uma temperatura de cerca de 4 ^{0}C acima da do concreto.

O campo de temperatura obtido ao meio-dia, Fig. 2 (b), apresenta um aumento em relação ao campo obtido às 10h na face de madeira de pinheiro, chegando a um platô de 36 ^{0}C, como mostra a Fig. 2 (b), uma diferença de aproximadamente 2 ^{0}C. A Fig. 2 (c) mostra uma variação insignificante nos máximos de temperatura de 12h para 14h. Neste horário, nota-se a uniformização da temperatura ao longo dos domínios (Fig. 2 (a)).

O modelo proposto ao PPGMC-UESC é uma estufa disposta verticalmente como mostra a Fig. 3. A patente concedida sob registro BR 102015005977-9 refere-se a esta estufa. A Fig. 3 apresenta a vista explodida da estrutura da torre, identificando a posição de cada elementos que faz parte da torre. A Tabela 2 apresenta os parâmetros físicos dos materiais da estufa [3].

A torre é preenchida com bandejas contendo amêndoas de cacau. Na parte inferior existe um sistema acionado por macaco hidráulico que permite o fluxo destas bandejas de baixo para cima, composto por uma alavanca, duas barras laterais rotativas, e uma outra barra na parte traseira da torre para proporcionar a sincronização do movimento Fig. 3.

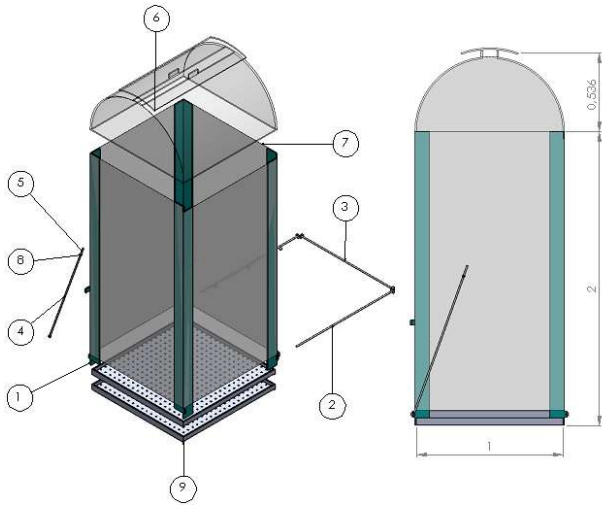

Figura 3: Secador vertical de cacau. Cotas em metros [4].

A Fig. 3 pode ser descrita observando a numeração sob o desenho da torre. O item 1 é o esqueleto básico da torre, o item 2 representa as barras laterais para auxiliar na elevação das bandejas e o item 3 é a barra de transmissão do movimento do item 2. O item 4 é o braço de alavanca que transmite a força para elevação das bandejas. O item 5 é a mão de alavanca. O item 6 é o teto do secador com exaustor. O item 7 é o filme de polietileno que reveste as laterais da torre. O item 8 é o pino e o item 9 é a bandeja para receber as amêndoas de cacau.

Para a realização das simulações do secador vertical proposta consideraram-se os materiais da Tabela 2, com suas respectivas propriedades.

Tabela 2: Propriedades dos materiais para a simulação da torre,

Propriedades	Polietileno	Concreto	Liga de alumínio
Capacidade Térmica (J/kg.K)	1900	900	900
Massa Específica (kg/m^3)	930	2300	2700
Condutividade Térmica (W/m.K)	0,38	1,8	160
Emissividade	0,50	0,95	0,05

Para a simulação da torre foram também considerados os mesmos parâmetros da barcaça, relacionadas a localização de Ilhéus na sua posição geográfica: latitude 14,789 Sul, longitude 39,0494 e fuso horário -3 horas, o mesmo período do dia com a mesma irradiação solar incidente. A torre foi submetida a temperatura ambiente que varia de acordo com a Eq. (1) dada pelo *software* COMSOL Multiphysics®, com temperatura em graus Celsius, sendo t o tempo em segundos. Para a simulação, a temperatura T é dada em graus Celsius e feita a conversão para Kelvin.

$$T = 27 + 3\cos\left[\frac{\pi}{12}(t-14)\right]. \quad (1)$$

A condição de isolamento térmico foi definida na espessura do polietileno (1,0 mm) e nas quatro faces da espessura do bloco de concreto. O fluxo de calor convectivo também foi considerado na modelagem do sistema, ou seja, o resfriamento das superfícies expostas ao ambiente externo, com temperatura mais baixa, implica na troca de calor. A temperatura 1,0 m acima do solo (plano oposto ao plano em que se encontra a barcaça) foi definida como 25 ^{0}C. A torre com a estrutura geométrica vista na Fig. 3 deve ser exposta à irradiação solar ao longo do dia. A irradiação é composta por vários comprimentos de ondas.

Todo o sistema é submetido à temperatura ambiente que varia ao longo do tempo de acordo com a Eq. (1). Durante a exposição à irradiação solar, o sistema foi modelado de maneira a permitir que os raios cujo comprimento de onda menores que 2,5 μm atravessem o filme plástico agrícola que envolve a estrutura metálica. Esta radiação é

então absorvida pelo sistema que se aquece. A emissão de radiação em comprimentos de ondas maiores que 2,5 μm são em grande parte retidas pelo filme plástico.

Partindo da geometria proposta na Fig. 3 procurou-se realizar simulações considerando a torre com as bandejas para a verificação da temperatura obtida em relação ao tempo de exposição ao Sol.

A Fig. 4 apresenta o principal avanço do projeto, que consistiu na verificação da resposta térmica da torre contendo 40 bandejas de acordo com o projeto. Observam-se altas temperaturas, pico de 55 ^{0}C às 14h Fig. 4 (b), e toda a superfície exposta às temperaturas próximas de 35 ^{0}C; isso é devido ao resfriamento causado pela troca de calor com ambiente externo, Fig. 4 (a).

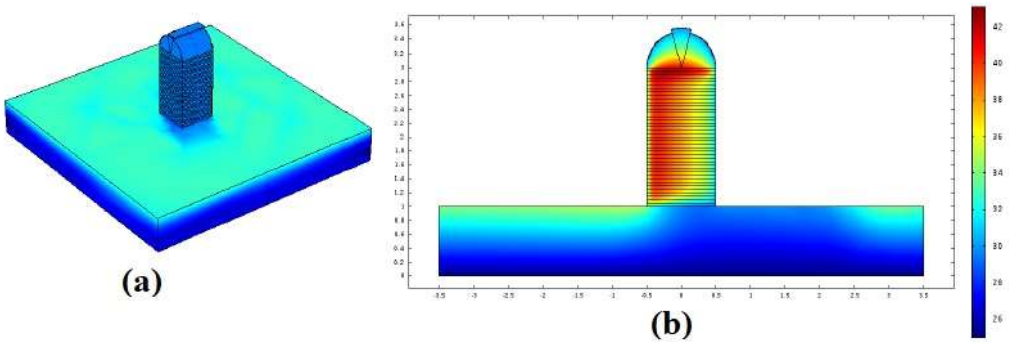

Figura 4: Distribuição da temperatura no secador vertical de cacau [4].

A Fig. 5 apresenta o protótipo no qual foram obtidos os dados reais da temperatura do sistema proposto. As temperaturas registradas pelo protótipo estão na Fig. 6, representadas pelos círculos de cor verde. A data da observação foi no dia 2 de junho de 2017, no qual a temperatura ambiente registrada na região era de 23 ^{0}C de mínima e 29 ^{0}C de máxima. A taxa calculada foi de 0,5 ^{0}C/h, próxima à taxa de temperatura obtida por simulação, de 0,4 ^{0}C/h.



Figura 5: Protótipo do secador vertical de cacau [9].

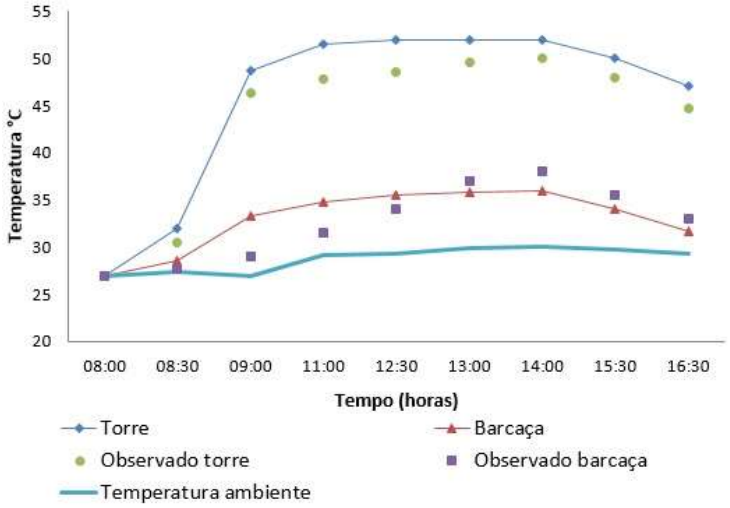

Figura 6: Distribuição da temperatura no secador vertical de cacau [10].

A curva vermelha, da barcaça simulada, possui temperatura média em torno 34,3 ^{0}C no horário em que a temperatura se estabiliza. A taxa da temperatura é de aproximadamente 1,65 ^{0}C/h. O máximo registrado pela simulação corresponde a 36 ^{0}C às 14h; a partir deste horário inicia-se a perda de calor no sistema barcaça. Os pontos quadrados são as temperaturas medidas na barcaça. Vemos que há uma boa concordância com a simulação.

A curva azul com pontos, sistema vertical simulado, apresenta temperatura de 51,6 ^{0}C quando o perfil de temperatura se estabiliza, com taxa de 0,40 ^{0}C/h. Também se observa que a temperatura máxima registrada é de 52 ^{0}C. A Fig. 6 destaca que a temperatura da torre vertical simulada possui temperatura maior que a temperatura da barcaça simulada.

Com esses valores (Fig. 6) é possível concluir que a torre de secagem consegue manter maior temperatura estabilizada no mesmo intervalo de tempo (9h até 16,5 h) em relação a barcaça. A presença do exaustor, item 6 da Fig. 3, na parte superior da torre, favorece a secagem com mais controle da temperatura.

4 Sistema Auxiliar para Secagem de Cacau

A forma tradicional de secagem das amêndoas do cacau ocorre em barcaças que consistem em estruturas que se assemelham a grandes tablados. Normalmente são construídas em madeira ou alvenaria, possuindo uma cobertura para a proteção contra intempéries. A secagem se processa pela incidência solar direta durante o período diurno.

Durante o período noturno ou alternativamente em dias de pouca incidência solar, utilizam-se secadores à combustão, alimentados pelo calor proveniente da queima de combustíveis como madeira e óleo, para acelerar a secagem das amêndoas. Porém, essa prática pode contaminar as amêndoas com resíduos, como fuligem e fumaça, sendo um fator de não aceitação no mercado e de redução do valor comercial.

Desse modo, desenvolver uma forma limpa e uniforme de fornecer calor para a secagem das amêndoas do cacau é essencial para garantir uma secagem que gere uma amêndoa com boas características e com maior valor comercial, que possa ser vendida para nichos de mercado que pagam mais por amêndoas de qualidade superior, como o mercado de chocolate *gourmet*, beneficiando-se o produtor.

O objetivo deste projeto [5] foi desenvolver um sistema que acumule a energia solar na forma de energia térmica durante o dia, e auxilie a secagem uniforme de grãos no período noturno. Este sistema alimentará um secador vertical para a secagem eficiente de grãos (Fig. 3), que foi proposto por Sales *et al*. e descrito na patente BR 102015005977-9 [6].

O sistema auxiliar acumulador de calor desenvolvido [5] possui pedido de patente no Instituto Nacional da Propriedade Industrial - INPI [7], e pode ser subdividido em dois conjuntos principais: um painel composto por

uma série de coletores solares parabólicos, que realiza a captação da energia solar, e um tanque acumulador de calor Fig. 7.

Os coletores parabólicos captam a energia solar e a transfere para uma tubulação que passa no centro focal desses coletores. Dentro dessa tubulação circula um fluido de trabalho, o qual é aquecido pela energia solar captada pelos coletores e por efeito termossifão (convecção natural) flui através de um trocador de calor (serpentina circular) imerso em um tanque cilíndrico isolado termicamente.

O fluido aquecido transfere energia térmica para a substância contida dentro do tanque, que a acumula sob a forma de calor. O calor armazenado aquece uma massa de ar que circula em outra serpentina concêntrica àquela por onde circula o fluido de trabalho. O ar aquecido seca as amêndoas do cacau. Após passar pelo trocador de calor em formato de serpentina no tanque, o fluido retorna para o conjunto de coletores solares, caracterizando o circuito fechado.

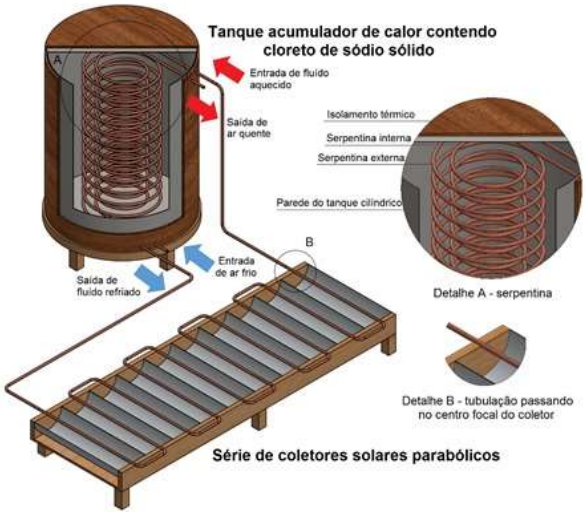

Figura 7: Sistema auxiliar proposto para a secagem de grãos [5].

As simulações computacionais do sistema auxiliar foram realizadas utilizando o *software* COMSOL Multiphysics®, que utiliza o método dos elementos finitos. Os modos de transferência de calor por condução, convecção e irradiação estão presentes no modelo criado, além de ser capaz de trabalhar com fluidodinâmica computacional.

O comportamento do sistema auxiliar acumulador de calor pode ser dividido em duas etapas: o carregamento do sistema durante o dia (quando ocorre o aquecimento do tanque acumulador de calor a partir da energia solar coletada pelo CPC); e o seu descarregamento durante a noite (quando o calor acumulado é utilizado para aquecer uma corrente de ar que é direcionada para o secador vertical Fig. 3).

Concluídas as etapas de simulação do coletor solar e de criação do modelo computacional para o sistema auxiliar, e duas simulações para o período de carregamento do sistema foram realizadas no COMSOL Multiphysics®: uma com um óleo térmico, utilizado para arrefecimento de transformadores, como fluido de trabalho; e a outra com a água como fluido de trabalho (para avaliar o desempenho de ambos os fluidos em sua dinâmica e transferência de calor). A Tabela 3 apresenta as propriedades dos fluidos para a temperatura de 25 °C [5].

Tabela 3: Propriedades dos fluidos de trabalho a 25°C.

	Óleo térmico	Água
Massa específica ρ (kg/m^3)	875,90	998,20
Viscosidade dinâmica μ (Pa · s)	$1{,}67\times10^{-2}$	$8{,}93\times10^{-4}$
Calor específico a pressão constante cp (J/kg · K)	1744,80	4182,70
Condutividade térmica k (W/m · K)	0,1103	0,6026

O escoamento do fluido de trabalho ocorre por ação do termossifão que gera a convecção natural causada pela variação da densidade do fluido devido ao seu aquecimento. A coluna de fluido quente gerada após a passagem pelos coletores é menos densa do que a coluna de fluido já resfriado. O escoamento do fluido ocorre devido à diferença de pressão entre a entrada e a saída do sistema de coletores solares.

As massas específicas do óleo térmico ($\rho_{óleo}$) e da água ($\rho_{água}$) em função da temperatura T são calculadas pelas equações empíricas, Eq. (2) e Eq. (3). A pressão p exercida pelo peso da coluna de fluido de trabalho na altura z é calculada pela Eq. (4) [5].

$$\rho_{óleo} = 1{,}05 - 0{,}58\ T - 6{,}4x10^{-5}\ T^2 \tag{2}$$

e

$$\rho_{água} = 838{,}46 + 1{,}4\ T - 3{,}0x10^{-3}\ T^2 \tag{3}$$

A pressão p em um certo ponto do fluido, decorrente do peso da coluna de fluido acima desse ponto, é dada pela expressão:

$$p = \rho g(z_0 - z) \tag{4}$$

onde z_0 é a altura de referência, em metros, da superfície livre do fluido. O nível mais alto no modelo corresponde ao nível do topo da serpentina do tanque, e z é a altura do ponto em questão Fig. 8.

O efeito termossifão, que gera a circulação do fluido no sistema, ocorre devido à pressão estimada pela Eq. (4). Quando o coletor aquece uma coluna de líquido, diminuído a sua densidade, a pressão ao longo dessa coluna é reduzida, criando uma diferença de pressão em relação a coluna de líquido não aquecido (que possui densidade maior), criando assim uma circulação natural do líquido no sistema, conforme a Fig. 8.

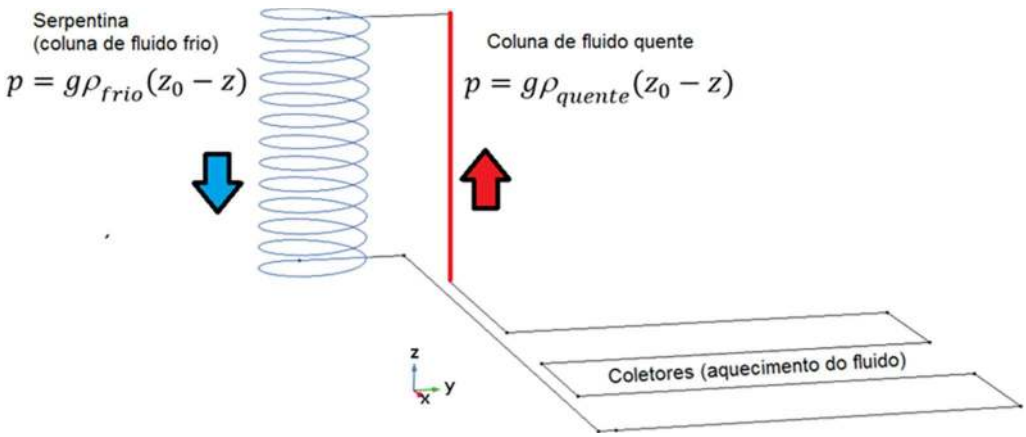

Figura 8: Estimativa da pressão na circulação do fluido no sistema.

A simulação do sistema auxiliar utilizou um óleo térmico vegetal como fluido de trabalho a fim de determinar o desempenho como trocador de calor do coletor solar para o tanque acumulador. A primeira etapa da simulação

consistiu no aquecimento do tanque acumulador de calor. O fluido de trabalho aquecido ao longo do dia pelos coletores solares cede calor para o NaCl sólido contido no tanque. Esta primeira etapa é considerada a etapa de carregamento do sistema, que funciona como um armazenador térmico.

O período simulado para a etapa de aquecimento do tanque inicia-se às 5h00 e vai até às 18h00. As Figuras 9 (a) e 9 (b) apresentam, respectivamente, a temperatura do sistema auxiliar às 12h00 (zênite solar) e às 18h00 (fim do carregamento).

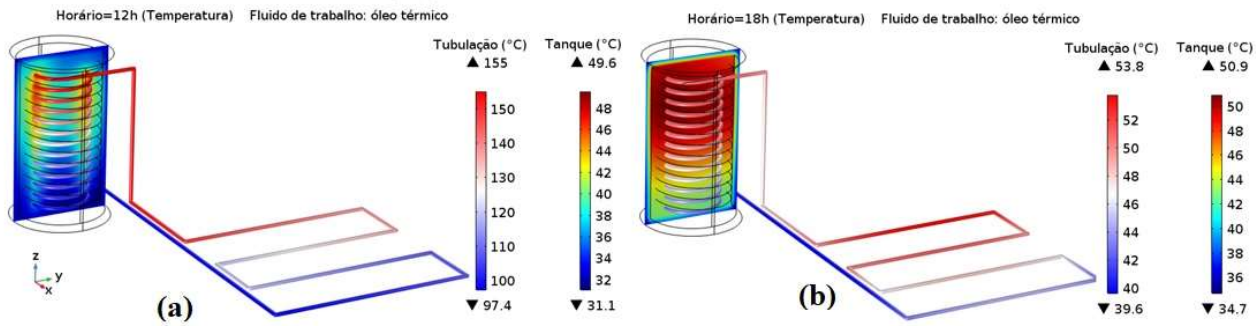

Figura 9: Temperatura do sistema auxiliar às 12h00 (a) e às 18h00 (b).

Após a simulação do carregamento do sistema até às 18h00, foi realizada a simulação da etapa de descarregamento do sistema. Nesta etapa, aquece-se a massa de ar direcionada ao secador vertical. O período simulado para o descarregamento inicia-se às 18h00 e vai até às 5h00 da madrugada do dia seguinte (ou o equivalente a 29 h de contagem contínua do tempo [5]). A Fig. 10 apresenta a simulação, em relação à temperatura, para o tanque e para o ar aquecido (que é injetado pela entrada inferior da serpentina), no horário de 22h00, durante o descarregamento do sistema.

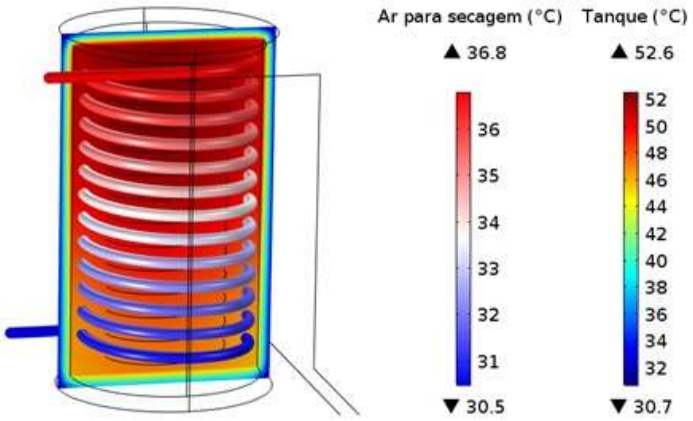

Figura 10: Temperatura durante a simulação do descarregamento do sistema, às 22h00.

A vazão de injeção do ar no sistema pode ser controlada por regulagem do bombeamento da massa de ar através da serpentina. Para uma primeira simulação do descarregamento, a velocidade da injeção de ar foi adotada em 0,50 m/s (correspondente à vazão de 12,9 L/min). A Figura 11 apresenta a evolução da temperatura do ar aquecido que é direcionado para a secagem dos grãos e a temperatura ambiente, no período de descarregamento.

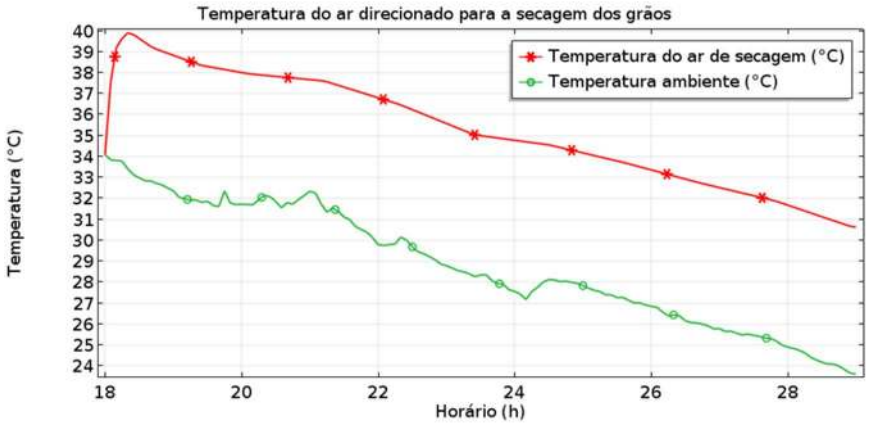

Figura 11: Temperatura do ar aquecido e a temperatura ambiente.

Analisando a Fig. 11, nota-se que, em média, o tanque acumulador de calor consegue manter o ar aquecido cerca de 6,5 °C acima da temperatura ambiente. O pico de 39,9 °C ocorre no início do descarregamento, chegando ao valor mínimo de 30,6 °C após 29 h (5h00 da madrugada do dia seguinte).

Considerando-se que a temperatura ideal de secagem das amêndoas do cacau é de 35 a 40 °C [8-11], das 18h00 até aproximadamente às 24h00 o sistema conseguiu gerar ar nesta faixa de temperatura (cerca de 6 horas de duração). Mesmo com uma temperatura abaixo da faixa ideal, a maior temperatura do ar aquecido em relação à ambiental resulta em melhores características das amêndoas secas.

5 Biogerador Tipo Marinha para uma Fazenda de Cacau

Apesar do cenário adverso ao crescimento econômico, a demanda por energia elétrica tem aumentado. Nessa perspectiva, este projeto de dissertação apresentada no PPGMC [12] analisou os fatores que influenciam a produção do biogás gerado em um biodigestor para produção de energia elétrica em uma fazenda de cacau, frente à crise energética atual [13].

Utilizou-se a modelagem matemática de um sistema de equações não-lineares para correlacionar a quantidade de bactérias que produzem o biogás à quantidade de biogás produzido no biodigestor. Estas relações são associadas, entre outros fatores, ao tipo de substrato disponível e a utilização da casca de cacau. Os resultados encontrados revelam a relação de equilíbrio entre o crescimento máximo de bactérias e a produção máxima de biogás, com posterior estabilização entre essas variáveis. As simulações realizadas com o substrato adicional da casca de cacau apresentam um ganho notável para geração de energia, exibindo um aumento da proliferação máxima de bactérias e o consequente ganho de produtividade para a produção do biogás.

Os parâmetros para verificação da viabilidade econômica e energética são analisados em relação ao sistema gerador de energia, considerando uma carga de biogás de 163 m^3 diários. O potencial técnico de geração de energia elétrica para o sistema escolhido sugere o suprimento da demanda de energia elétrica com grande margem para a autonomia energética da propriedade. Além disso, os indicadores econômicos de viabilidade demonstram valores promissores quantos aos benefícios obtidos com a substituição da carga de energia comprada da concessionária pela gerada no sistema, proveniente do biogás, mostrando que o empreendimento pode ser considerado viável [12].

Na natureza, o metano, conhecido como gás de pântano, é formado no trato digestivo de ruminantes. Em plantas esse gás é formado, principalmente, por meio de um processo biológico que ocorre quando o material orgânico (biomassa) se decompõe em uma atmosfera úmida na ausência de ar, mas na presença de microrganismos metabolicamente ativos chamadas bactérias metanogênicas. O metano tem um efeito estufa de cerca de 80 vezes superior ao dióxido de carbono, por isto é muito relevante sua eliminação da atmosfera.

O biogás, composto principalmente de metano e dióxido de carbono, juntamente com algumas impurezas, tem sua produção induzida em câmeras hermeticamente fechadas denominadas biodigestores. No interior dos

biodigestores a circulação de ar é impedida para que a atuação das bactérias anaeróbicas metanogênicas no substrato seja possível.

O projeto e construção de biodigestores dependem das diversas necessidades de aplicação. Genericamente, são classificados em biodigestores industriais, biodigestores urbanos e biodigestores agrícolas, para setores rurais [13-17].

Para um funcionamento mais eficiente, geralmente dispõem de um tanque de entrada para deposição dos dejetos que se dá através de um conduto denominado tubo de carga, um tanque de carga onde se processa a fermentação da matéria orgânica (digestor), um septo que divide e direciona o fluxo do resíduo dentro do digestor, um gasômetro onde se acumula o biogás gerado pela digestão anaeróbica, um tubo de descarga para expelir o resíduo líquido depois de fermentado, um leito de secagem onde o resíduo líquido perde o excesso de água se transformando no biofertilizante e uma tubulação instalada na parte superior do gasômetro para conduzir o biogás até o ponto de consumo, conforme Fig. 12.

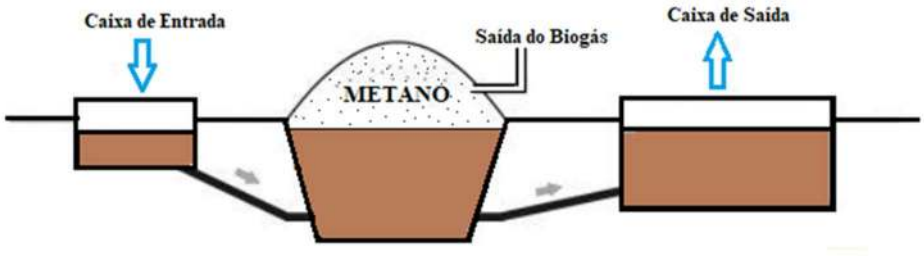

Figura 12: Esquema de funcionamento de um biodigestor.

O modelo escolhido no estudo foi biodigestor da Marinha brasileira (Fig. 13), desenvolvido na década de 1970 [13]. É um modelo com formato raso e longo, do tipo horizontal, que possui uma área de exposição ao sol maior, aumentando com isso a produção de biogás [13]. Por possuir uma largura maior que a profundidade, necessita de uma área grande para que consiga armazenar uma maior quantidade de resíduos, sendo uma das limitações deste modelo.

A cúpula é feita de polímero maleável, atualmente confeccionada em Policloreto de Vinila (PVC), que infla com a produção do biogás, sendo por isso também conhecido como tipo lona. As vantagens dessa cúpula estão no baixo custo apresentado, na facilidade de limpeza e manutenção, e na maior resistência à corrosão apresentada pela água e pelo ácido sulfídrico presente na mistura gasosa. A caixa de carga é construída em alvenaria, podendo ser mais larga, o que evita entupimentos. A construção não exige restrições quanto ao tipo de solo, podendo ser feita tanto enterrada quanto sobre a superfície do solo. Os maiores cuidados são relativos a vazamentos na cúpula, que se não tratados adequadamente, podem ocasionar explosões.

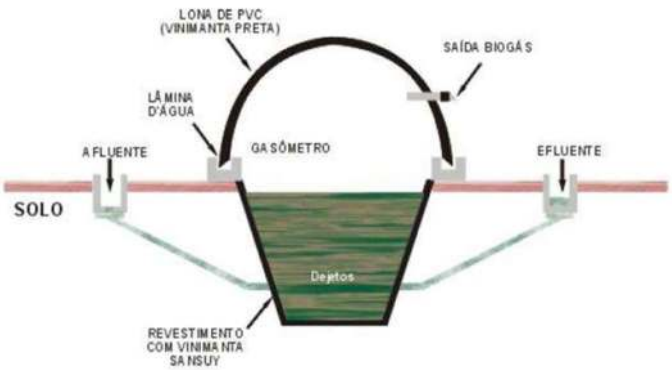

Figura 13: Modelo da Marinha do Brasil [13].

O aproveitamento da biomassa pode ser realizado de diversas formas, através da combustão direta, processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou processos biológicos como a digestão anaeróbica e a fermentação. O biogás gerado a partir dos processos biológicos pode ser utilizado em sistemas moto geradores para a produção de energia elétrica. As tecnologias mais utilizadas são as microturbinas e os motores de combustão interna do ciclo Otto, que através de pequenas modificações permite o uso do biogás como combustível.

Para que o biogás possa ser utilizado em motores ou turbinas a gás é necessário a identificação de parâmetros como a vazão, composição e poder calorífico do substrato utilizado. Isso permite a determinação do real potencial de geração elétrica e dimensionamento dos processos de pré-tratamento do biogás, como a remoção do H_2S (ácido sulfídrico) e umidade, de modo a evitar a corrosão nos equipamentos [12].

A produção de biomassa, definida como toda matéria orgânica de origem vegetal e animal, tem grande potencial no aproveitamento de resíduos agrícolas. A casca do fruto do cacaueiro é um subproduto de alto valor nutritivo que representa 80% de sua composição. É obtido pela quebra e separação das sementes, e raramente é utilizado em seu potencial energético [14].

Pesquisas vêm sendo desenvolvidas em todo mundo na tentativa de descobrir as potencialidades da casca de cacau, como a transformação da energia presente na casca em calor ou energia elétrica. O projeto básico está sendo realizado em parceria com empresa Legon, de Santa Rita do Sapucaí - MG, que desenvolve equipamentos eletrônicos para controle de biodigestores. A Fig. 14 mostra um equipamento desenvolvido, inicialmente projetado no PPGMC e depois construído pela Legon, para o controle do biogerador tipo marinha para geração de energia elétrica.



Figura 14: Sistema eletrônico para controle de biodigestores.

Os estudos realizados têm por base sistemas que já se encontram em funcionamento na zona rural de Santa Rita do Sapucaí (Minas Gerais). A placa eletrônica recebe dos sensores dados de temperatura e umidade [12] presentes na câmara de digestão.

A composição das bactérias que atuam na fermentação do substrato, assim como o processo de formação do biogás, são extremamente complexos. Neste contexto, foi proposto um modelo analítico que relaciona apenas duas das componentes básicas de um biodigestor [12], quantidade de bactéria e volume de biogás. Em termos matemáticos, tem-se $b = b(t)$ quantidade de bactérias que produz o biogás, e $g = g(t)$ quantidade de biogás produzido presente no interior do biodigestor. Supondo que b seja variável dependente do tempo t, onde b é considerado uma população de bactérias geral, e não apenas de uma espécie específica. O volume de bactérias depende de sua própria quantidade e seu crescimento pode ser inibido pelas condições reinantes no meio como espaço, alimentos, acidez, temperatura etc., ou pela presença do próprio biogás produzido $g(t)$.

A derivada temporal da quantidade de biogás no interior do biodigestor é proporcional à quantidade de bactérias presentes e uma diminuição se houver retirada. Estas hipóteses estão relacionadas no seguinte sistema [17]:

$$\begin{cases} \frac{db}{dt} = F(b) - pbg \\ \frac{dg}{dt} = kb - h(g,t) \end{cases}, \tag{5}$$

cujas constantes p e k são positivas; $F(b)$ fornece a variação das bactérias em relação ao parâmetro b, independentemente da presença de biogás; o termo pbg é responsável pelo fator de inibição, e a função $h(g,t)$ é corresponde à retirada de biogás.

A análise do sistema apresentado na Eq. (5) é realizada com foco nas condições de crescimento das bactérias para o caso particular em que todo o gás produzido seja mantido no interior do biodigestor $h(g,t) = 0$. Em seguida, temos as condições de retirada deste gás de dentro do biodigestor, quando em (5) tem-se $F(b) = \alpha b$.

Os parâmetros introduzidos no sistema de Eqs. (5) possuem influência significativa na modelagem do sistema biodigestor, pois além de constantes para o modelo matemático, seus valores apresentam também significado físico no processo de biodigestão. Assim, para o sistema de Eqs. (5), o parâmetro α representa a taxa de crescimento de bactérias, k é a taxa de diminuição do biogás na ausência de bactérias e p é o coeficiente de interação. A partir da determinação dos parâmetros α, k e p o comportamento do sistema pode ser simulado de maneira mais confiável, levando em conta suas características específicas mostrado na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros operacionais do sistema [6]

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
α	Taxa máxima de crescimento específico de bactérias hidrogenotróficas - metanogênicas	2,0	dia^{-1}
k	Constante de inibição	0,2	dia^{-1}
p	Coeficiente de interação: $\begin{cases} sem\ cacau \\ 2{,}4 \times 10^3 kg \\ 3{,}6 \times 10^3 kg \\ 4{,}8 \times 10^3 kg \end{cases}$	$\begin{cases} 0{,}041 \\ 0{,}032 \\ 0{,}029 \\ 0{,}026 \end{cases}$	$m^{-3}dia^{-1}$

Assim, as curvas de crescimento de bactérias em função da produção de biogás, resultante dos valores avaliados na Tabela 5, são mostradas na Fig. 15.

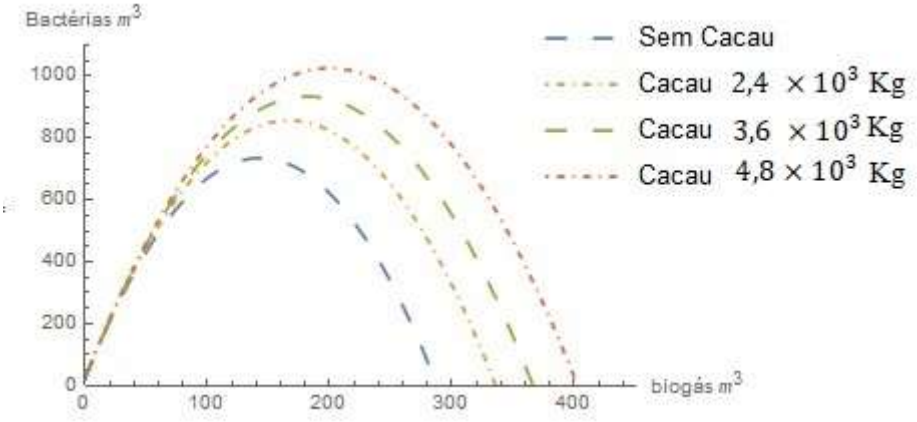

Figura 15: Volume de bactérias em função do volume de biogás.

Os resultados obtidos mostram que no primeiro estágio de degradação da matéria orgânica, a produção inicial de biogás é nula e ocorre próxima da origem dos eixos cartesianos. Nesta fase ocorre ação das bactérias hidrolíticas e fermentativas [15]. Após a criação das condições adequadas no efluente, as bactérias metanogênicas produzem

biogás e seu valor cresce no eixo das abscissas da Fig. 15 (Bactérias em m^3). Em contrapartida, a proliferação de bactérias se reduz, atingindo um valor nulo para diferentes níveis de produção de biogás [12].

A Fig. 15 mostra que a proliferação máxima de bactérias e produção máxima de biogás aumentam com a carga de dejetos de casca de cacau. Assim, quando não há utilização da casca de cacau, o volume máximo de bactérias se dá em torno de 260 m^3, com uma produção máxima de biogás de 100 m^3. Por outro lado, quando se considera a produtividade média de 400 arrobas por hectares (unidade de massa do cacau, tradicional, por área), o valor do coeficiente de interação p cai para 0,026 m^{-3} dia^{-1}. Assim, tem-se uma proliferação máxima de bactérias em torno de 420 m^3, e uma consequente produção máxima de biogás em torno de 160 m^3. Estas diferenças podem ser estimadas pela equação $b_{max}(b_0) = b_0 + \frac{\alpha^2}{2kp}$ quando $g = \frac{\alpha}{p}$ [17].

À medida que ocorre a morte das bactérias metanogênicas, há transformação do material orgânico no chamado afluente (biofertilizante) e o biogás produzido permanece no interior do biodigestor [12]. A Figura 16 mostra que há um aumento da proliferação de bactérias à medida que o volume de carga diária b_0 é aumentado. O crescimento de bactérias alcança um máximo em torno do segundo dia de fermentação, para todos os casos. O efeito de diferentes quantidades de casca de cacau e consequentemente diferentes parâmetros de interação é visto na Fig. 15. Após isso, o volume de bactéria decresce, indicando a perda das bactérias (morte) entre o quarto ou o quinto dia de fermentação. Após este período, deve ser adicionada nova carga de substrato.

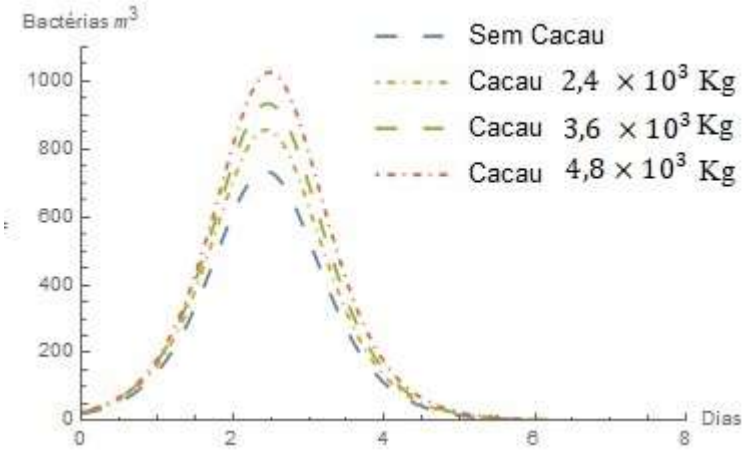

Figura 16: Volume de bactérias em função do tempo.

Nas áreas rurais, a biomassa é um recurso renovável cuja utilização pode reduzir o volume de resíduos descartados e a emissão de gases do efeito estufa. Além disto, pode ser utilizada em sistemas energéticos de cogeração ou suprimento de demandas isoladas da rede, com uso de biodigestores.

O caso analisado apresenta a viabilidade de autonomia energética com o uso do biogás. A biomassa disponível para esta conversão foi encontrada em dejetos de animais e de pessoas presentes na propriedade rural. Por se tratar de uma fazenda de cultivo de cacau, a casca deste fruto foi considerada como insumo mais importante no volume de substrato [17].

6 Conclusão

Neste artigo apresentamos três problemas abordados em dissertações defendidas no Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual de Santa Cruz. A solução proposta nestes problemas mostra a interação do programa de pós-graduação na sociedade com pesquisas e resoluções de problemas reais, em particular afeita à lavoura cacaueira do Sul da Bahia. As soluções tecnológicas

apresentadas visam a automatização dos processos de fermentação e secagem das amêndoas de cacau e a geração de energia renovável a partir de biomassa de cacau.

Os trabalhos têm carácter interdisciplinar e permitem obter soluções a partir de modelos conceituais, matemáticos, computacionais, experimentais e até mesmo a construção de protótipos. Além disto, produção científica e tecnológica foram geradas, com potencial de transferência de tecnologia para o setor produtivo da região de Ilhéus e do país. Estes resultados demonstram a importância que pesquisas acadêmicas podem impactar socialmente no desenvolvimento regional, estadual e nacional.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao avaliador pelas sugestões para o texto e às agências financiadoras CNPq e FAPESB.

Referências

[1] E. C. Santos, J. H. Sales, e C. A. Lima, "Comsol multiphysics model of a solar dryer," *Proceedings of the 2014 COMSOL Conference in Curitiba*. Comsol Ed. Curitiba, Brasil, 2014, pp. 1-5. Disponível em: https://www.comsol.fr/paper/download/200181/santos_paper.pdf

[2] M. S. C. P. Brainer. *Produção de Cacau*, Caderno Setorial ETENE, Ano 6, no. 149, Janeiro, 2021.

[3] H. G. O. Silva, A. J. V. Pires, F. F. Silva, C. M. Veloso, G. G. P. Carvalho, A. S. Cezário, e C. C. Santos, "Farelo de cacau (Theobroma cacao L.) e torta de dendê (Elaeis guineensis, jacq) na alimentação de cabras em lactação: Consumo e produção de leite," *Revista Brasileira de Zootecnia*, vol. 34, no. 5, pp. 1786–1794, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1516-35982005000500040

[4] E. C. Santos, "Modelagem de um Secador de Grãos Vertical," Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Bahia, Brasil, 2014.

[5] L. V. M. Soglia, "Sistema Auxiliar para Secagem de Grãos," Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Bahia, Brasil, 2019.

[6] J. H. O. Sales, A. V. Santos, e G. W. L. N., Filho, "Secador de Cacau Vertical," BR 102015005977-9. Patente concedida: 19/10/2021.

[7] J. H. O. Sales, A. T. Suzuki, G. P. A. Lima, e L. V. M., Soglia, A. V. Santos, "Sistema Auxiliar para Secagem de Grãos," BR 102016025537-6. Depósito da patente: 17/07/2018.

[8] R. C. F., Brito, "Modelagem de um Biodigestor Tipo Marinha para Análise de Viabilidade de Autonomia Energética em uma Fazenda de Cacau," Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Bahia, Brasil, 2021.

[9] J. H. O. Sales e T. Cândida, "Efeito da Temperatura sobre a Amêndoa de Cacau: Secador Vertical," *Revista GEINTEC*, vol. 6. no. 3. pp. 3437-3446, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.7198/S2237-072220160003015

[10] F. V. Amigo, G. P. Lima, J. H. Sales, e K. G. Estival, “Inovação Tecnológica na Secagem do Cacau: Estudo da Viabilidade Econômica de um Secador Vertical Solar,” *Cadernos de Prospecção*, vol. 10, no. 4, pp. 706-720, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.9771/cp.v10i4.23307

[11] J. H. O. Sales, L. V. M. Soglia, e P. S. Girotto, “Sistema de Secagem via Energia Solar e Acumulador de Calor para Amêndoas de Cacau,” *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*, vol .4, no. 4, pp. 1-17, 2019. Disponível em: http://dx.doi.org/10.21575/25254782rmetg2019vol4n5909

[12] J. H. O. Sales e R. C. F. Brito, “Biogenerator for a Cocoa Farm,” *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, vol. 8, no. 1, pp. 13736–01, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.18540/jcecvl8iss1pp13736-01-12e

[13] L. Prati, “Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás Gerado por Biodigestores,” Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Disponível em: http://www.eletrica.ufpr.br/ufpr2/tccs/148.pdf

[14] CEPLAC, “Aproveitamento dos Subprodutos, Derivados e Resíduos do Cacau,” *III Congresso Brasileiro do Cacau: Inovação Tecnológica e Sustentabilidade*, Ilhéus, Bahia, 2012.

[15] J. H. Sales, K. D. E. Santos, C. M. Jr., Fornari, G. S. A. Segundo, “Coconut Fiber Sensor for Humidity,” *Brazilian Journal of Development*, vol.7, no.2, pp. 17707-17720, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-423

[16] R. C. F. Brito e J. H. O. Sales, “Modelagem de um Biogerador tipo Marinha para Produção de Energia Elétrica Usando o Cacau como Aditivo,” em *Anais do XXVI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica (CREEM)*, 25, 2019, Ilhéus, Brasil. Disponível em: https://doi.org/10.26678/ABCM.CREEM2019.CRE2019-0194

[17] R. C. F. Brito e J. H. O., Sales, “Viabilidade Econômica do Biogerador tipo Marinha na Fazenda de Cacau,” *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, vol. 8, no. 2, pp. 13949–01e. https://doi.org/10.18540/jcecvl8iss2pp13949-01e