



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO**  
**PRÓ-REITORIA ACADÊMICA**  
**COORDENAÇÃO GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS**

**JOSENILDO ARAUJO DA SILVA**

**SIMULAÇÃO DE UM AQUECEDOR SOLAR DE  
ÁGUA COMO ETAPA DO PROCESSO DE  
DESTOXICAÇÃO DA TORTA DE MAMONA**

**Recife/2007**

JOSENILDO ARAUJO DA SILVA

**SIMULAÇÃO DE UM AQUECEDOR SOLAR DE ÁGUA  
COMO ETAPA DO PROCESSO DE DESTOXICAÇÃO  
DA TORTA DE MAMONA**

Dissertação apresentada como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento em Processo Ambientais, pela Universidade Católica de Pernambuco

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Modelagem, Controle e Otimização de Processos

Orientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

Co-orientador: Prof. Dr. Mohand Benachour

Recife/2007

### Ficha Catalográfica

S586s Silva, Josenildo Araújo da.

Simulação de um aquecedor solar de água como etapa do processo de destoxicação da torta de mamona / Josenildo Araújo da Silva ; orientador Valdemir Alexandre dos Santos ; co-orientador Mohand Benachour, 2007.

58 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Curso de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2009.

1. Simulação por computador. 2. Aquecedores solares de água. 3. Métodos de simulação. 4. Torta de mamona – Destoxicação. 5. Aquecimento solar. I Título

CDU 577.1

ATA DE DEFESA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO ALUNO

Cópia

JOSENILDO ARAUJO DA SILVA

Aos dez dias do mês de agosto do ano de dois mil e sete, realizou-se às quatorze horas, na Sala 306 do 3º andar do Bloco G4, à rua Almeida Cunha 245 - Boa Vista, Recife-PE, a sessão pública de defesa da Dissertação "SIMULAÇÃO DE UM AQUECEDOR SOLAR DE ÁGUA COMO ETAPA DO PROCESSO DE DESTOXICAÇÃO DA TORTA DE MAMONA", apresentada e defendida pelo aluno **Josenildo Araújo da Silva**, licenciado em Pedagogia pela Fundação Universidade de Pernambuco e que concluiu os créditos exigidos para obtenção do título de "Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais", segundo encaminhamento da Profa. Dra. Galba Maria de Campos Takaki, Coordenadora do Programa de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais desta Universidade e documentação constante nos arquivos da Secretaria de Registros Acadêmicos, desta Pró-reitoria. Os trabalhos foram instalados e coordenados pelo Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos, presidente da Banca Examinadora, que foi constituída pelos Professores Doutores: Eliane Cardoso de Vasconcelos, da Universidade Católica de Pernambuco; Maurício de A. da Motta Sobrinho, da Universidade Federal de Pernambuco e Valdemir Alexandre dos Santos, da Universidade Católica de Pernambuco, orientador do mestrando. Como membros Suplentes: Profa. Dra. Galba Maria de Campos Takaki, da Universidade Católica de Pernambuco e Prof. Dr. Carlos Costa Dantas, da Universidade Federal de Pernambuco. Esteve presente o Prof. Dr. Mohand Benachour, co-orientador do mestrando. O Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos, como presidente da Banca Examinadora, solicitou ao mestrando que apresentasse sua Dissertação. Em seguida, a Banca Examinadora tendo decidido aceitar a Dissertação passou à arguição pública do mestrando. Encerrados os trabalhos de arguição, os examinadores deram o parecer final sobre a Dissertação, tendo sido o candidato APROVADO, por todos os membros da Banca Examinadora, e para constar eu, Nicéas Izabel Alves, secretária lavrel a presente Ata que assino juntamente com os membros da Banca Examinadora. Recife, 10 de agosto de 2007.

\_\_\_\_\_  
Nicéas Izabel Alves

\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Eliane Cardoso, de Vasconcelos

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Maurício de A. da Motta Sobrinho

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Mohand Benachour

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos  
(presidente da Banca Examinadora)



Aos meus familiares, amigos e, especialmente, à Coordenadora do Programa de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais Profa. Galba Maria de Campos Takaki que me apoiaram no decorrer desses dois anos.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Valdemir Alexandre dos Santos, por suas sugestões, incentivos e orientações na elaboração deste trabalho.

À minha esposa Eva, pela compreensão, pelo estímulo e pela incansável luta em busca dos objetivos.

À professora Elizabeth Siqueira e ao Prof. Jorge, de Língua Estrangeira, por terem sido responsáveis pela tradução e revisão do texto do resumo e abstract desta Dissertação.

Aos professores do mestrado que através dos conteúdos de suas disciplinas orientaram no desenvolvimento da dissertação.

Em especial à Coordenadora do Programa de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais Profa. Dra. Galba Maria de Campos Takaki.

Aos demais professores que exerceram forte influência em minha formação: Dra. Eliane Vasconcelos, Dra. Kaoru Okada, Dra. Alexandra Salgueiro, Dr. Carlos Alberto, Dr. João Teotônio Manzi Monteiro, Dra. Beatriz Suzanna O. Ceballos, a quem muito estimei em estudos e pesquisas da Disciplina Tratamento Biológico de Rejeitos.

A todos os funcionários da Biblioteca, em especial àqueles que trabalham na Estação de Pesquisa: Simone, Pedro, Alexandre, Ellys.

Aos familiares, amigos e colegas de trabalho que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

À minha mãe, irmã e demais familiares que souberam compreender os momentos mais difíceis ajudando-me para que eu prosseguisse os meus estudos.

A Deus, pela oportunidade de saúde e vida para que eu otimizasse este processo, como realização de mais um sonho.

## RESUMO

Diversos procedimentos têm sido utilizados para destoxicação da torta de mamona. Entre esses a solubilização das substâncias responsáveis pelo caráter tóxico desse resíduo, ricina e ricinina, em água quente e/ou soluções salinas aquecidas. Foram desenvolvidos algoritmos para simular o aquecimento solar da água como estratégia para baixar custos no processo de destoxicação da torta de mamona, originária do processo de produção de biodiesel. Para isto foi utilizada a ferramenta computacional Simulink/MATLAB®. Foram então analisadas várias situações com base na proposta de aquecimento direto, por se tratar de uma forma de transferência de calor menos dispendiosa. São propostos modelos dinâmicos em diferentes graus de complexidade para uma avaliação prévia do processo de aquecimento da água por meio de energia solar. Apresentam-se os diagramas de blocos dos modelos computacionais, correspondentes a cada uma das etapas de elaboração. Os modelos matemáticos propostos proporcionaram importantes previsões para valores de temperatura nas diferentes fases de elaboração, apresentando-se como importante ferramenta de trabalho para uma próxima etapa que é a de validação experimental do modelo final.

**Palavras-chave:** Balanço de energia, simulação dinâmica, aquecimento solar direto, destoxicação da torta de mamona.

## ABSTRACT

Algorithms have been developed in order to simulate the water solar heating as a strategy for lowering castor bean pie destoxication costs, among from the biodiesel oil for production extraction process. Diverse procedure, substances solubilization, this residue toxic character factor, found in hot water and in some saline solutions, motivated this water heating modeling work, through solar energy, since this procedure type can and low cost to the above-mentioned methods, on account of this, one has used computational smulink/matlab in order to simulate and to arise favorable conditions for this technique use strategies elaboration. One has, then, analized several situation, departing from a termal heating proposal, since this is a less expensive heat transference form. Of this form an objective function was proposal to create 0 variable that esteem the behavior of the system and better define the excellent conditions for the considered process. Among these, the established variable as parameters for the simulated conditions, are presented the results, taking itself in account values of income for the process, existing in literature. One porpuses dynamic models, under complexity different degress, for a water heating process previous evaluation, through solar energy. Temperature variations, in the process diferrent stages, have been simulated, with simulink/matlab aid for the above-mentioned system behaviour analysis one presents computational models. blocks diagrams, correspondent to each one of the elaboration stage. Proposed mathematical models provided important previsions for temperature values, in the above-mentioned system different components, resulting as a work important tool for a next stage which is that one of the optimization.

**Key words:** Energy balance, Dynamic simulation, Direct solar Warming, Solar heater, detoxification of castor cake.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coletor Solar Tipo Placa Plana .....	23
Figura 2 - Tipos de mecanismos disponíveis para uso da energia solar.....	24
Figura 3 - Componentes básicos de um coletor solar tipo placas .....	31
Figura 4 - Apresenta Modelo de Sistema Básico de Aquecimento Solar constituído em sua composição de um coletor solar, um tanque de estocagem e armazenamento da temperatura (Boiler) reservatório térmico, e o tanque de alimentação (caixa d'água) .....	32
Figura 5 - Esquema com componentes de um aquecedor solar de água para destoxicação da torta de mamona.....	33
Figura 6 - Modelo M1 em Simulink/Matlab .....	42
Figura 7 - Modelo M2 em Simulink/Matlab .....	42
Figura 8 - Modelo 3 em Simulink/Matlab com entrada tipo degrau .....	43
Figura 9 - Variação de temperatura do tanque de estocagem como resposta do modelo M1 .....	45
Figura 10 - Variação de temperatura do tanque de estocagem como resposta do modelo M1 .....	46
Figura 11 - Variação de temperatura do destoxicador resposta do modelo M2 .....	46
Figura 12 - Temperatura da água na saída do trocador como resposta do modelo M3.....	47
Figura 13 - Temperatura da água no tanque como resposta do modelo M3.....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Parâmetros de entrada dos programas de simulação.....	44
----------	---	----

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $Q_e$  - quantidade de calor estocado no tanque, J
- $W_e$  - massa de água no tanque de estocagem, kg
- $C_v$  - calor específico da água a volume constante,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$
- $T_e$  - temperatura da água no tanque de estocagem,  $^\circ C$
- $\dot{Q}_{in}$  - quantidade de calor por unidade de tempo que chega ao tanque, J/min
- $\dot{w}_{in}$  - vazão mássica da água entrando no tanque, kg/min
- $T_{in}$  - temperatura da água que chega ao tanque,  $^\circ C$
- $\dot{Q}_{out}$  - quantidade de calor por unidade de tempo que sai do tanque, J/min
- $\dot{w}_{out}$  - vazão mássica da água saindo do tanque, kg/min
- $T_{out}$  - temperatura da água que são do tanque,  $^\circ C$
- $\dot{Q}_{ac}$  - quantidade de calor por unidade de tempo acumulada no tanque, J/min
- $\dot{w}_{ac}$  - vazão mássica da água através do tanque, kg/min
- $T_{in}$  - temperatura da água que chega ao tanque,  $^\circ C$
- $T_{out}$  - temperatura da água que sai do tanque,  $^\circ C$
- $Q_d$  - quantidade de calor estocada no tanque de destoxicação, J
- $W_d$  - quantidade de água no tanque de destoxicação, kg
- $C_p$  - calor específico da água à pressão constante,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$
- $T_d$  - temperatura do tanque de destoxicação,  $^\circ C$
- $\dot{Q}_{ind}$  - quantidade de calor por minuto chegando ao tanque de destoxicação, J/min
- $\dot{w}_{ind}$  - vazão mássica da água chegando ao tanque de destoxicação, kg/min
- $T_{ind}$  - temperatura da água chegando ao tanque de destoxicação,  $^\circ C$
- $\dot{Q}_{outd}$  - quantidade de calor por minuto chegando ao tanque de destoxicação, J/min
- $\dot{w}_{outd}$  - vazão mássica da água chegando ao tanque de destoxicação, kg/min
- $T_{outd}$  - temperatura da água chegando ao tanque de destoxicação,  $^\circ C$
- $\dot{Q}_d$  - quantidade de calor por minuto que se acumula no tanque de destoxicação, J/min
- $\dot{w}_d$  - vazão mássica da água que circula pelo tanque de destoxicação, kg/min
- $W_t$  - massa de água no interior do trocador de calor, kg
- $\dot{w}$  - vazão mássica de circulação da água no trocador, kg/min
- $T_{outt}$  - temperatura da água saindo no trocador,  $^\circ C$
- $T_{int}$  - temperatura da água entrando no trocador,  $^\circ C$
- $K_{te}$  - coeficiente de transferência de calor entre o trocador e o tanque de estocagem,  $J/(min \cdot ^\circ C)$
- $K_p$  - coeficiente de perdas térmicas do tanque,  $J/(min \cdot ^\circ C)$

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo
MME	Ministério das Minas e Energias
GLP	Gás Liquefeito e Energias
A &M	Academy & Maritime

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	15
1 REVISÃO DA LITERATURA .....	18
1.1 Biodiesel e sua viabilidade .....	18
1.2 Destoxicação da torta de mamona.....	19
1.3 Energia solar .....	22
1.4 Coletor solar para aquecimento da água.....	24
1.5 Considerações finais .....	26
1.6 Referências .....	26
2 SIMULAÇÃO DINÂMICA DE UM AQUECEDOR SOLAR DE ÁGUA .....	29
2.1 Introdução .....	29
2.2 Material e métodos.....	31
2.2.1 Modelagem do processo .....	32
2.2.2 Simulação computacional.....	42
2.3 Resultados e discussão.....	44
2.4 Conclusões e sugestões .....	48
2.5 Referências .....	49
ANEXO I.....	50
ANEXO II.....	56

## INTRODUÇÃO

Várias crises de petróleo ocorridas nas últimas décadas, além de provocarem sérios danos à economia mundial têm o mérito de induzirem a busca de combustíveis alternativos. Várias alternativas de substituição aos combustíveis advindos aos derivados do petróleo estão postas hoje para os diferentes setores das atividades produtivas.

As crescentes preocupações econômicas e com o meio ambiente, além das previsões que as reservas de energias renováveis cheguem ao fim nos próximos cinqüenta anos, têm incentivado a busca por novas fontes de energia, tais como energia solar, energia eólica e biocombustíveis.

No Brasil, cerca de 39,7 % da energia gerada é proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo (ANP, 2004). O óleo diesel é o derivado de petróleo mais consumido no Brasil, sendo empregado em transportes terrestre, ferroviário, aquático e na alimentação de máquinas industriais e em termoelétricas para a geração de energia (MME, 2007).

O Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel, lançado pelo Governo Federal, no ano de 2004, criou uma janela de oportunidades para a produção de ruminantes pela possibilidade de alimentação de farelos e tortas, resultantes do processo de extração do óleo. Dentre as oleaginosas disponíveis, a mamona destaca-se pelo potencial de exploração em regiões marginalizadas do processo de desenvolvimento econômico e pela maior intensidade no aproveitamento de mão-de-obra.

Apesar do potencial de utilização da torta de mamona na alimentação de ruminantes, devido à presença de ricina – proteína altamente tóxica que inativa específica e irreversivelmente ribossomos eucarióticos (SEVERINO, 2006), esse subproduto do processo de extração do óleo de mamona tem sido empregado exclusivamente como fertilizante orgânico, reduzindo a competitividade da mamona em relação às demais oleaginosas (OLIVEIRA et al., 2006).

Um trabalho recente, realizado por Anadan et al. (2005), comparou a eficácia de diferentes métodos de destoxicação da ricina da torta da mamona, demonstrando

que a temperatura dos diferentes processos, próxima de 100 °C, é um fator de alta importância para o rendimento do método.

O uso da eletricidade no aquecimento de água à baixa temperatura (40-90 °C) é uma peculiaridade do sistema energético brasileiro, historicamente explicável pelo baixo custo de geração hidroelétrica e pela carência de combustíveis fósseis. Entretanto, a comodidade no uso da eletricidade dificulta a remoção do hábito nacional de uso de chuveiros, torneiras e fornos elétricos que podem ser vantajosamente substituídos por aparelhos a combustíveis. No caso dos chuveiros e torneiras elétricas, a substituição mais racional seria pela energia solar - limpa, segura e de baixo custo.

Apesar de todas essas vantagens, o usuário de eletricidade apenas se lembra da energia solar em tempos de crise, como a do racionamento de 2001. Já houve várias iniciativas para se romper o impasse, mas os resultados são, ainda, modestos. Entretanto, a crescente participação da eletricidade na demanda de energia, a custo também crescente, impõe a adoção de medidas de incentivo ao uso da energia solar.

A utilização da energia solar serve para o aquecimento residencial de água, e até mesmo para algumas aplicações comerciais, industriais, e deve sempre ser complementado por um sistema auxiliar (a gás ou elétrico), no caso de uma seqüência de dias nublados. A importância desta modalidade seria a redução da demanda, permitindo o direcionamento da energia elétrica para outras finalidades. Aliás, poderia economizar-se também gás natural e GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), principalmente nas aplicações industriais que os utilizam para aquecimento de água.

Para a etapa de aquecimento da água, este trabalho propõe como objetivo o uso da energia solar como fonte energética de aquecimento. Para servir de ferramenta à elaboração e projeto de dimensionamento de coletores solares de aquecimento da água, realizando-se a modelagem do comportamento térmico dos

componentes desse tipo de coletor. Para isso foi utilizada a linguagem Simulink/MATLAB (The Student Edition of Matlab, 2004), pela flexibilidade e praticidade oferecidas pelos blocos geradores de modelos dinâmicos, disponibilizados pelo Simulink.

## **1.2 Revisão da Literatura**

### **1.2.1 Biodiesel e sua viabilidade**

A alternativa de combustíveis de fontes renováveis para motores a diesel tem-se tornado muito importante devido a diminuição de reservas de petróleo e às consequências ambientais causadas pelos gases de exaustão de máquinas movidas a combustíveis oriundos do petróleo. Dessa forma, o biodiesel é uma opção bem promissora, uma vez que na sua combustão (LIMA NETO *et al.*, 2006):

- são emitidas baixas quantidades de CO, materiais particulados e hidrocarbonetos não queimados;
- o CO<sub>2</sub> emitido na combustão pode ser reciclado pela fotossíntese, minimizando o impacto do efeito estufa;
- possui ponto de fulgor alto e é menos volátil que o diesel de petróleo, o que o torna mais seguro para manuseio e transporte;
- melhora a lubricidade do motor, reduzindo o desgaste e aumentando a vida útil da máquina;
- não é tóxico e;
- é biodegradável e origina-se de fontes renováveis.

Entre os mecanismos de estímulos à difusão do biodiesel, o selo Combustível Social dá às empresas produtoras desse biocombustível certificadas vantagens tributárias e acesso a financiamentos (AZEVEDO, 2006). O selo é obtido mediante a compra da matéria-prima, a preços pré-estabelecidos, de agricultores cadastrados no Pronaf (Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar), além do fornecimento de assistência técnica a esses agricultores. Uma das justificativas do Governo Federal para estimular a difusão do biodiesel é a redução nas importações

de diesel de petróleo decorrente do uso comercial do diesel B2 (2% de biodiesel) (US\$ 160 milhões por ano e aumenta para US\$ 400 milhões com o uso do B5 (5% de biodiesel)). Além disso, as condições naturais brasileiras, adequadas às oleaginosas que oferecem matéria-prima para a obtenção do referido biocombustível, conferem ao produto um elevado potencial de exportação. Também, deve ser observado que a cadeia produtiva do biodiesel tem grande capacidade de gerar empregos, especialmente nas regiões do Semi-Árido e Norte. Apesar dos argumentos favoráveis à produção do biodiesel, esbarra-se ainda em diversos obstáculos. Necessita-se de tecnologia para processar diferentes matérias-primas, criar processos de produção contínuos, aperfeiçoar técnicas de transporte, organizar produtores e valorizar co-produtos das diferentes oleaginosas.

### **1.2.2 Destoxicação da torta de mamona**

A torta de mamona é o resíduo da extração do óleo das sementes da mamoneira (*Ricinus comunis*). Trata-se de produto com elevado teor de proteínas, produzido na proporção aproximada de 1,1 tonelada para cada tonelada de óleo extraída (AZEVEDO & LIMA, 2001; SRINIVAS & NAGARAJ, 2000; BENESI, 1979), ou seja, corresponde a cerca de 55 % do peso das sementes, valor que pode variar de acordo com o teor de óleo da semente e do processo industrial de extração do óleo. Sua proteína é composta por 60 % de globulinas, 16 % de albuminas, 4 % de proteoses e 20 % de glutelinas, proteínas conjugadas e compostos nitrogenados não-protéicos (BON, 1977).

O alto teor de proteínas na composição da torta de mamona torna-a atraente para alimentação animal; porém, a presença de princípios tóxicos e alergênicos tem dificultado essa alternativa. As características anti-nutricionais se devem, principalmente, a três fatores: ricina, ricinina e CB-1A (Composto Alergênico Castor Bean-1A) (GARDNER et al., 1960). A toxidez da mamona já é conhecida desde a antiguidade, a qual já foi relatada pelos antigos hebreus, egípcios, persas, gregos e romanos, embora somente na segunda metade do século XX tenha-se descoberto que sua toxidez e alergenicidade se deviam a diferentes compostos (MACKINNON & ALDERTON, 2000).

Os primeiros pesquisadores que trabalhavam com os alérgenos da torta de mamona faziam testes pela injeção intradermal de soluções em animais sensibilizados ou os expondo à poeira do produto (KLING, 1974). Outras técnicas mais adequadas foram então sendo desenvolvidas. Gardner et al. (1960) utilizaram uma técnica bioquímica em que extratos das amostras a serem testadas eram misturados ao anti-soro de coelho contra o alérgeno, observando-se a formação de precipitados, Os mesmos autores confirmaram os resultados usando o teste de Schultz-Dale, que se baseia na medição do grau de contração de músculos uterinos de cobaias (porquinho-da-índia) sensibilizados.

Na série de estudos realizados na década de 70, na Universidade Federal do Rio de Janeiro, Perone (1966) utilizou a técnica de hemaglutinação passiva na qual o antígeno (CB-1A) é ligado a hemácias de carneiro através de tratamento com ácido crômico, seguindo-se a determinação da concentração do antígeno por meio da inibição da hemaglutinação com anti-soro de coelho contra o alérgeno da mamona. Este método possibilitou a realização das medições de forma mais prática que as técnicas até então disponíveis. Atualmente, a disponibilidade de métodos ainda mais rápidos, simples e confiáveis para detecção do complexo de alérgenos na torta de mamona é uma das carências tecnológicas para a pesquisa e sua industrialização (ÁVILA FILHO; JESUA, 2006).

Diversos processos industriais foram sugeridos para a desalergenização da torta de mamona. Bon, (1977) demonstrou a possibilidade de solubilizar as proteínas da torta de mamona utilizando diversas enzimas proteolíticas (papaína, pepsina, subtilisina, pancreatina, protease "Inuiu", bomelaína e pronase), mas o método não possui viabilidade para aplicação industrial pelas condições extremas de pH a que precisa ser submetida, pelo alto custo das enzimas e por não se obter destoxicação e desalergenização total.

Foi testado em laboratório um método em que as proteínas eram solubilizadas e os fatores tóxicos e alergênicos eliminados em solução, procedendo-se à precipitação (CARVALHO, 1978). O método é pouco prático, pois o pH de extração precisa ser extremamente ácido ou alcalino (1,0 ou 11,0), além de

dependem de processos de alto custo energético (liofilização) e não ter suficiente eficácia.

O processo de desalergênização pelo uso de vapor em diversas pressões e tempos de exposição foi testado (MOTTOLA et al., 1971); a inativação dos alérgenos foi obtida, mas percebeu-se que a alta temperatura em que a torta era exposta causava sensível redução do teor do aminoácido lisina. Os mesmos autores apresentaram um método mais próximo da viabilidade técnica, utilizando uma planta-piloto no tratamento da torta adicionada de óxido de cálcio a 4 %, submetida a 120 °C com vapor durante 15 minutos, na qual se obteve relativa redução da alergenicidade.

Em 1985, a UNIDO (*United Nations Industrial Development Organization*) em parceria com a “Texas A&M University” conduziram um grande projeto com o objetivo de tornar viável um processo industrial conjugado para destoxicação e desalergênização da torta de mamona, tendo em vista a economicidade e viabilidade técnica (SEVERINO, 2005). O projeto obteve sucesso e, em 1988, foi apresentado um processo em escala piloto capaz de produzir a torta de mamona destoxicada e livre de alérgenos, no qual se utilizou uma extrusora para aumentar a temperatura e a pressão e promover um processo contínuo, sendo a torta misturada com hidróxido de cálcio e água. As principais conclusões do projeto foram:

- a ricina foi completamente destruída;
- o alérgeno pode ser destruído com adição de água e produtos químicos, sendo os melhores aditivos em ordem decrescente: hidróxido de sódio + hipoclorito de sódio; carbonato de cálcio (calcário); bicarbonato de sódio; hidróxido de sódio e hipoclorito de sódio;
- sozinho, o tratamento químico não foi eficaz na destruição do CB-1A;
- a perfeita mistura da torta com o calcário – ( $\text{Ca CO}_3$ ) é imprescindível e esta foi uma das dificuldades encontradas para funcionamento da planta-piloto;
- aparelhos extrusores são muito eficientes devido à exposição a altas temperaturas por curto período, mas sem o aditivo químico e correta umidade não são efetivos;
- a temperatura de extrusão deve ser de, pelo menos, 130 °C, se possível de 150 °C;
- a torta destoxicada e desalergênizada é segura como alimento animal;

- a torta de mamona não pode ser utilizada como única fonte de proteína na dieta de animais.

Embora o projeto tenha sido relatado como bem sucedido, por razões desconhecidas, até o presente, as indústrias de óleo de mamona ainda não realizam a destoxicação e desalergenização da torta de mamona, resposta que não foi encontrada na literatura.

Na Índia, reconhece-se que é possível destoxicar a torta e que ela teria melhor aceitação que a torta de outras oleaginosas; no entanto, 85 % da torta de mamona ainda é utilizada com adubo orgânico (Directorate of Oilseeds Research, 2004).

### **1.2.3 Energia solar**

Uma das fontes de energia na Terra é, sem dúvida, a energia solar. Além disso, trata-se de uma fonte não poluente e praticamente inesgotável. Segundo Pedrini (2002), com a energia solar limpa, segura e gratuita para o aquecimento da água, consegue-se evitar por metro quadrado:

- a inundação de 56 m<sup>2</sup> de área fértil na implantação de usinas hidroelétrica;
- consumo de 55 kg de GLP por ano;
- consumo de 66 litros de diesel por ano e;
- consumo de 256 kg de lenha por ano.

Devido à inclinação do eixo sobre o qual a Terra gira e da trajetória da mesma ao redor do sol, a quantidade de energia solar que se pode captar em um determinado lugar do Planeta depende do local, dia e hora. As variações são mais intensas nas regiões polares, onde as inclinações da superfície terrestre são maiores. A maior parte do território brasileiro localiza-se próxima à linha do Equador, de modo que não se observam grandes variações na duração solar do dia; além do mais, pode-se ajustar a inclinação do coletor solar de acordo com a latitude local, e com a intensidade de energia que se deseja.

O uso comercial da energia solar no Brasil ainda é muito inferior em relação a outros tipos de recursos energéticos denominados convencionais. Mesmo em países industrializados o uso comercial da energia solar tem sido para produzir aquecimento da água e secagem de produtos agrícolas (JESUS, 2001).

Um dos processos mais conhecidos de utilização da energia solar de forma direta é o aquecimento de fluidos, através de coletores solares planos, também conhecidos como coletores de placa plana (Figura 1). Simplificadamente, estes coletores são compostos de uma placa, na qual é fixada uma serpentina por onde percorre o fluido a ser aquecido. Este conjunto é instalado dentro de uma caixa em cujo fundo é colocado um isolante térmico, e fechada em sua face superior por uma cobertura transparente. Tal qual em outras máquinas térmicas, existe um grande estudo sobre os coletores solares em relação à sua capacidade de captar a radiação solar e convertê-la em energia calorífica. Este estudo envolve o fluxo energético de um corpo exposto ao Sol e as suas perdas térmicas por radiação, convecção e condução, perdas estas que crescem conforme o aumento da temperatura deste corpo.

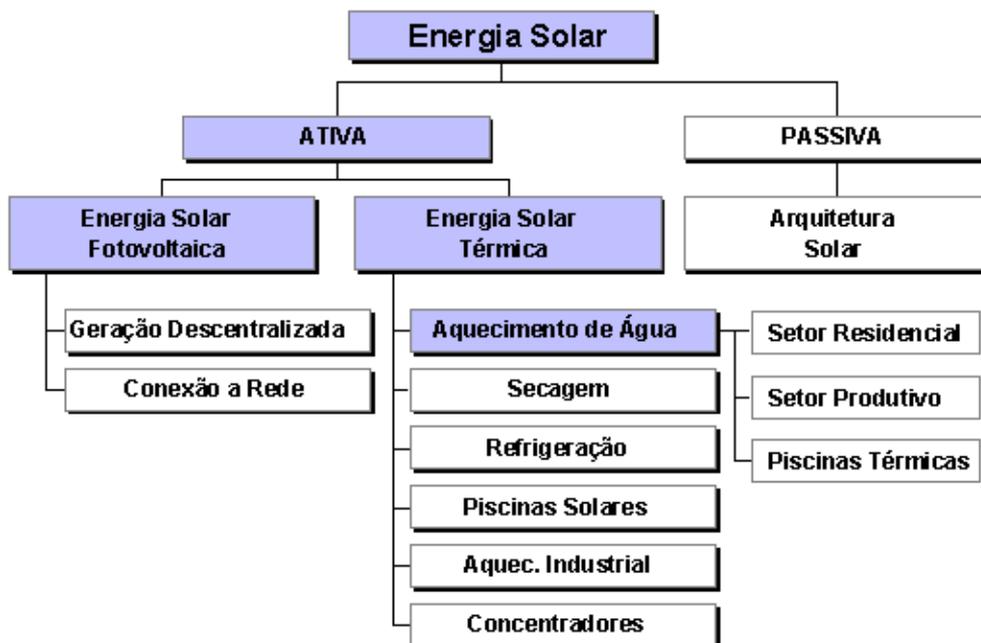


Figura. 1 - Tipos de mecanismos disponíveis para uso da energia solar

Fonte: Cardoso et al. 2005

### 1.2.4 Coletor solar para aquecimento da água

Uma das mais importantes formas de aproveitamento da energia solar atualmente é através do aquecimento da água, tendo em vista que este tipo de mecanismo já vem sendo utilizado no Brasil desde a época de 1970, quando um dos mais sérios problemas mundiais eclodiu, designado de crise energética.

O aquecimento da água possui elevado custo. Entretanto, considerando que o Brasil é praticamente um país de clima tropical, torna-se viável o seu custo-benefício devido a longa vida útil do sistema (BARCELOS JÚNIOR, 2003).

Mveh et al. (1998) realizaram estudos da eficiência térmica de coletores solares sem cobertura de superfície para produção de água quente, em locais onde a temperatura é baixa. Segundo esses autores a eficiência térmica é muito mais afetada pela temperatura ambiente e pela velocidade do vento.

O desenvolvimento de correlações para determinação da eficiência térmica diária, em média mensal, de um sistema de aquecimento solar de água foi realizado por Siqueira et al. (1998). A correlação obtida mostrou que a eficiência é uma correlação linear das condições meteorológicas, da qualidade do coletor empregado e dos parâmetros do projeto que relacionam o volume do tanque de armazenagem, volume de demanda e área de coleta. Essa relação é útil, já que é uma alternativa simples e rápida da eficiência média mensal, sem necessidade de se recorrer à determinação experimental ou à simulação computacional.

Estudos teóricos foram realizados por Gomes & Fico (2000) sobre a otimização teórica do desempenho de coletores a energia solar de placas. Foram introduzidos degraus na simulação no perfil de desempenho da aleta, para diferentes materiais com diferentes espessuras de placas.

Testes de campo foram realizados por Moraes Neto (2000), utilizando protótipos de coletores solares parabólicos, para levantamento das curvas de

eficiências, constantes de tempo e eficiências óticas representadas pelos ângulos de incidência dos raios solares.

Os limites da aplicabilidade de coletores solares sem cobertura para aquecimento de água para fins domésticos foram verificados por Eurides et al. (2002). As simulações simplificadas mostraram que esses tipos de coletores podem ser uma ótima opção para aquecimento da água em lugares com temperaturas ambientes médias acima de 20 °C, sendo, contudo, necessária cautela em regiões onde o inverno é rigoroso.

Barcelos Júnior (2003), realizou experimentos para determinação de condições ótimas de rendimento em coletores solares planos para aquecimento de água, associados à uma relação também otimizada de custo-benefício, empregou diferentes condições de operação e de materiais de confecção dos coletores. Foi por isso necessária a construção de um modelo de bancada com um módulo com características comerciais para servir de referência, e outros oito módulos distintos para permitir uma comparação de resultados em termos de diferença de temperatura e fluxo de calor através da superfície da base do coletor. Os resultados mostraram que sem cobertura tais coletores podem prover uma melhor eficiência térmica a custos reduzidos.

### **1.2.5 Considerações finais**

A torta de mamona é o principal subproduto da cadeia produtiva da mamona, produzida a partir da extração do óleo das sementes desta oleaginosa. Em todo o mundo, seu uso predominantemente tem sido como adubo orgânico, embora possa obter valor significativamente maior se utilizada como alimento animal, aproveitando o alto teor de proteínas. No entanto, este uso não tem sido possível, até o presente momento, devido à presença de elementos tóxicos e alergênicos em sua composição e à inexistência de tecnologia viável em nível industrial para seu processamento.

Métodos de fácil execução e confiáveis é um dos primeiros requisitos para que a indústria possa operar uma unidade de destoxicação e desalergênização da torta de mamona. Entre esses métodos a utilização de solubilização das

substâncias tóxicas e alergênicas em água quente ou soluções aquosas de determinados sais a temperaturas da ordem dos 80 °C, torna o aquecimento com energia solar da água uma ferramenta de trabalho atrativa.

Apesar de ainda haver uma impressão geral de a energia solar ser uma fonte “alternativa”, já existe um extenso desenvolvimento de variadas formas de, para seu aproveitamento, muitas delas já em uso comercial. Além disso, a energia solar vem de encontro à tendência mundial de evitar fontes poluentes, já que de seu uso não resulta nenhuma forma de rejeito de qualquer espécie.

### 1.3 Referências Bibliográficas

ALMEIDA, C. H.; AMORIM, H.; CASTELLETY, C.E.M.; PERES, S. Caracterização dos co-produtos do processamento de biodiesel de mamona para geração de energias térmica e elétrica. In: **I Congresso da Rede Brasileira de Biodiesel**. Brasília, DF, 2006. p. 68-72.

ANP – Agência Nacional de Petróleo. Resolução nº 30, de 20 de setembro de 2004. **Regulamento Técnico nº 04/2004**. Brasília: Diário oficial da União, nº 236.

ÁVILA FILHO, S; JESUA, D. S. Métodos para determinação de toxinas presentes na torta de mamona. In: **I Congresso da Rede Brasileira de Biodiesel**, Brasília, DF, 2006. p. 24-27.

ÁVILA FILHO, S.; DUARTE, F.; RIBEIRO, N.M. Métodos para desintoxicação de tortas de oleaginosas. In: **I Congresso da Rede Brasileira de Biodiesel**, Brasília, DF, 2006. p. 34-37.

AZEVEDO, A. M. M. Instrumentos de difusão do biodiesel no Brasil: uma análise a partir de conceitos da economia evolucionista. In: **I Congresso da Rede Brasileira de Biodiesel**, Brasília: DF, 2006. p. 313-317.

AZEVEDO, D. M. P.; LIMA, E. F. (ed.). **O Agronegócio da mamona no Brasil**. Embrapa Informação Tecnológica. Brasília, DF, 2001. 350p.

BARCELOS JÚNIOR, A. L. **Análise termoeconômica de coletores solares planos. Dissertação de Mestrado**. Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba. PR, 2003. 72 p.

BELTRÃO, N. E. M. **Torta de mamona (*Ricinus communis L.*): fertilizante e alimento**. Comunicado Técnico n. 177 da Embrapa, dezembro 2003. Disponível em: <[http://www.cnpa.embrapa.br/plataforma\\_mamona/publicacoes/04.pdf](http://www.cnpa.embrapa.br/plataforma_mamona/publicacoes/04.pdf)>. Acesso em: 15 mai. 2007.

BENESI, F.J. **Influência do farelo de mamona (*Ricinus comunis* L.) destoxicado sobre o proteinograma sanguíneo e desempenho de suínos.** Dissertação de Mestrado. UFMG. Belo Horizonte, MG, 1979. 63p.

BON, J.H. **Solubilização das proteínas da mamona por enzimas proteolíticas.** Dissertação de Mestrado. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1977. 136p.

CARDOSO, F. F.; GONÇALVES, O. M.; PRADO, R.T.A.; JOHN, V.M. Conservação de energias e uso de energias alternativas. Disponível em: <<http://pcc2540.pcc.usp.br/Material%202005/Energia%20Relat%C3%B3rio%20Final%20-%20PCC2540.doc>>. Acesso em: 24 dez. 2006.

CARVALHO, M.E.A. **Estudos para a obtenção de concentrados de proteínas da mamona desintoxicados e desalergenizados.** Dissertação de Mestrado. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1978. 78p.

DIRECTORATE OF OILSEEDS RESEARCH. Diversified uses of Castor. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON CASTOR SEED, CASTOR OIL AND ITS VALUE ADDED PRODUCTS. **Proceedings** ... Ahmedabad: The Solvent Extractors Association of India, 2004. p.50-57.

GARDNER JR,; H. K.; D'AQUIN, E. L.; KOULTUN, S. P. Detoxification and deallergenization of Castor Beans. **The Journal of the American Oil Chemists Society**. v.37, 1960. p.142-148.

GOMES, D. G.; FICO, N. G. Otimização de coletores solares de placas planas. In: **Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul**, Porto Alegre, RS, 2000.

JESUS, J. A. A. **Participação dos Componentes do Balanço de Radiação Solar na Floresta Nacional de Caxiuanã-PA.** Trabalho de Conclusão de Curso. UFPA, Belém, PA, 2001.

KLING, S.H. **Estudo da solubilidade das proteínas da mamona.** Dissertação de Mestrado. UFRJ. Rio de Janeiro, 1974. 67p

LIMA NETO, A. F.; SANTOS, S. S. S.; MOURA, E. M.; MOURA, C. V. R. Biodiesel de mamona por via etílica. In: **I Congresso da Rede Brasileira de Biodiesel**, Brasília: DF, 2006. p. 96-100.

MACKINNON, P.J.; ALDERTON, M.R. An Investigation of the plant toxin ricin, by sodium hypochlorite. **Toxicon**, v.38, 2000. p.287-291.

MME – Ministério de Minas e Energia – Reunião Prodeem – mercado Invisível. Disponível em: <<http://www.mda.gov.br/>>. Acesso em: 20 abr. 2007.

MORAES NETO, J. H. Projeto, Fabricação, Montagem e Testes de Diferentes Protótipos de Coletores Solares Parabólicos Compostos. In: **Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul**, Porto Alegre, RS, 2000.

MOTTOLA, A.C.; MACKEY, B.; HERRING, V. Castor meal antigen deactivation – pilot plant steam process. **Journal of the American Oil Chemists Society**, v.48, set, 1971. p.510-513.

MVEH, J. D. M. et al. Eficiência de Coletores Solares. In: **Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Cobertura, Aquecimento e Ventilação do Mercosul**, Porto Alegre, RS, 1998. p.123-134.

OLIVEIRA, A. S.; CAMPOS, J. M.; VALADARES FILHO, S. C.; DETMANN, E.; SOUZA, S. M.; FONSECA, A. B.; AZEVEDO, J. A. G. Consumo, digestibilidade dos nutrientes e indicadores de função hepática em ovinos alimentados com dieta contendo farelo ou torta de mamona tratado ou não com hidróxido de cálcio. In: **I Congresso da Rede Brasileira de Biodiesel**, Brasília, DF, 2006. p. 8-13.

PEDRINI, A. A methodology for building energy modelling and calibration in warm climates. **Building and Environment**, Estados Unidos: Elsevier, v. 37, 2002. p. 903-912.

PERONE, J. C. **Contribuição ao estudo da torta de mamona**. Rio de Janeiro: Departamento de Imprensa Nacional, 1966. 51p.

SEVERINO, L. S. **O que sabemos da torta de mamona**. Disponível em: <<http://www.cnpa.embrapa.br/produtos/mamona/publicacoes/DOC134.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2006.

SIQUEIRA, A. M. O.; KRENZINGER, A. Cálculo da Eficiência Diária em Média Mensal de um Sistema de Aquecimento Solar Operando em Regime de Termossifão. In: **Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul**, Porto Alegre, RS, 1998.

SRINIVAS, C.V.S.; NAGARAJ, G. Factor influencing ricin, the toxic protein in castor cake and its detoxification. **Journal of the Oil Technology Association of India**, v.32, n.1, 2000. p.21-23.

**The Student Edition of Matlab**, Student User Guide, Prentice-Hall, MATLAB Curriculum Series, 2004. 484 p.

## CAPÍTULO 2

### SIMULAÇÃO DINÂMICA DE UM AQUECEDOR SOLAR DE ÁGUA

<sup>1</sup>SILVA, J. A. ; <sup>2</sup>SANTOS, V. A.; <sup>3</sup>BENACHOUR, M.

<sup>1</sup>Mestrando em Desenvolvimento de Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco – E-mail: [josenildoparis@pop.com.br](mailto:josenildoparis@pop.com.br)

<sup>2</sup>Prof. Dr. do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Católica de Pernambuco – E-mail: [vas@unicap.br](mailto:vas@unicap.br)

<sup>3</sup>Prof. Dr. do Departamento de Engenharia Química do Centro de Tecnologia e Geociência da UFPE  
E-mail: [mbena@ufpe.br](mailto:mbena@ufpe.br)

**RESUMO** - São propostos modelos dinâmicos em diferentes graus de complexidade para uma avaliação prévia do processo de aquecimento da água por meio de energia solar. As variações de temperatura em diferentes etapas do processo foram simuladas com auxílio do Simulink/MATLAB, para análise do comportamento dos referidos sistemas. Apresentam-se os diagramas de blocos dos modelos computacionais, correspondentes a cada uma das etapas de elaboração. Os modelos matemáticos propostos proporcionaram importantes previsões para valores de temperatura nos diferentes componentes do referido sistema, apresentando-se como importante ferramenta de trabalho para uma próxima etapa que é a de otimização dos referidos sistemas.

**Palavras-chave:** Aquecedor solar, Modelo dinâmico, destoxicação, torta de mamona.

**ABSTRACT** - Different models with various complexity degree to previous evaluations of water solar heating processes are proposed. The dynamic model was simulated with aid of the Simulink/MATLAB, for analysis of behavior of the referred systems. Diagrams of computational blocks of model, corresponding models to each one of the elaboration step for the heating systems, are presented. The considered mathematical model provided to be an important step for the proposed water solar heating, as an important work tool for the next stage that is the optimization step.

**Key words:** Solar heater; Dynamic model; destoxication, castor cake.

## 2.1 Introdução

O Brasil possui condições climáticas extremamente favoráveis e grande extensão territorial, os quais apresentam-se como itens indicativos à produção de biodiesel como uma opção de energia renovável na sua matriz energética. O referido combustível deverá servir inicialmente, como complemento ao óleo diesel e, futuramente, poderá ser utilizado nos motores diesel, quando houver oferta suficiente. Essa parece ser uma excelente opção, não só econômica, mas porque o biodiesel apresenta-se como uma fonte de energia menos poluente que o diesel de petróleo (RIBEIRO, 2001). Entretanto, substituir o óleo diesel sem levar em conta seus subprodutos não é tarefa fácil, uma vez que o diesel continua sendo mais barato que o biodiesel.

O Brasil importa atualmente cerca de 18 % do óleo diesel que consome e, para fazer a substituição, faz-se necessária uma grande produção de matéria-prima vegetal (TORRES & CARNEIRO, 2006). A viabilidade do biodiesel só tem possibilidade de acontecer, caso haja a superação de dificuldades provenientes da introdução de inovações em ambientes fortemente protegidos por tecnologias há muito consolidadas.

Uma visão crítica da cadeia produtiva do biodiesel a partir da mamona indica alguns desafios como as destinações adequadas dos subprodutos do processo – a torta de mamona e a glicerina. Dessa forma, o desenvolvimento científico para a superação desses desafios pode tornar o biodiesel viável sem a necessidade de subsídios.

A produção do biodiesel a partir da mamona produz uma quantidade de torta dessa oleaginosa numa relação média ponderal de 1,1:1 de biodiesel (LOBO et al., 2006). O mercado nacional de torta, contabilizando todas as culturas tem um potencial de 908 milhões kg/ano com a produção de B2 (mistura de 2 % de biodiesel e 98 % de diesel de petróleo). Uma estimativa de que 20 % dessas oleaginosas seja de mamona tem-se, atualmente, um mercado potencial de ração de US\$ 54.00 milhões. Contudo, para que se efetive o uso da torta de mamona como ração é necessário que se remova a toxidez que impede o seu uso como ração animal.

A literatura tem apresentado diversos métodos voltados para a destoxicação e desalergenização da torta de mamona utilizam agentes físicos e químicos. Como agentes físicos tem-se lançado mão de encharcamento, extração com vapor, fervura, autoclave e forno de ar quente (ANADAN et al., 2005). Como agentes químicos conhece-se o uso de NaOH, NaCl, Ca(OH)<sub>2</sub>, formaldeído e amônia. O uso de agentes químicos tem demonstrado uma maior eficiência média sobre os agentes físicos e existem pouquíssimos dados sobre o uso da combinação das duas técnicas. Entretanto, a forma de utilização dos agentes químicos é a de solução aquosa e, na maioria dos casos a temperatura de extração é, em torno, de 100 °C. Dessa forma, uma das principais questões para o desenvolvimento de métodos para destoxicação da torta de mamona é a disponibilidade de energia térmica, a baixo custo, para o referido processo.

O princípio de funcionamento do aquecimento solar de água é bastante simples, de baixo custo e baseia-se na transmissão de calor através dos materiais que compõem o sistema. É composto por dois itens básicos: o reservatório térmico (boiler) e o coletor solar. Este último componente, o de mais fácil construção e menos dispendioso, é o coletor do tipo placas (BEZERRA, 2001). O coletor é um dispositivo do aquecedor solar destinado a recolher à radiação solar incidente e convertê-la em calor, cedendo-a à água. A serpentina, parte principal do coletor solar, é responsável pela absorção da radiação solar, constituída de um feixe de tubos metálicos (geralmente cobre) por onde circula a água. O reservatório térmico é parte do aquecedor solar que armazena água quente produzida pelo coletor solar. É isolado termicamente de modo a reduzir as perdas de calor para o ambiente.



## 2.2 Material e Métodos

### 2.2.1 Modelagem do processo

A Figura 1 ilustra os componentes do sistema de aquecimento solar da água: aquecedor solar, conduto por onde fluem os vapores de água externos ao coletor e tanque de armazenamento. Um esquema simplificado de uma instalação de um aquecedor solar, ilustrado pela Figura 2, foi elaborado para dar subsídio à obtenção de um modelo matemático para previsões sobre as diferentes temperaturas alcançadas pela água em circulação no processo. Na etapa inicial de aquecimento, em contato com a fonte de calor, um aquecedor solar recebe a água de temperatura mais baixa do tanque de estocagem. Devido a um processo de circulação natural, a água quente fica na parte superior do tanque e a de temperatura menor é direcionada em relação ao aquecedor solar (DUFFIE & BECKMAN, 1991). Através de uma serpentina no interior do tanque de armazenagem, água leva calor para um tanque extrator de substâncias tóxicas (destoxicador) da torta de mamona.

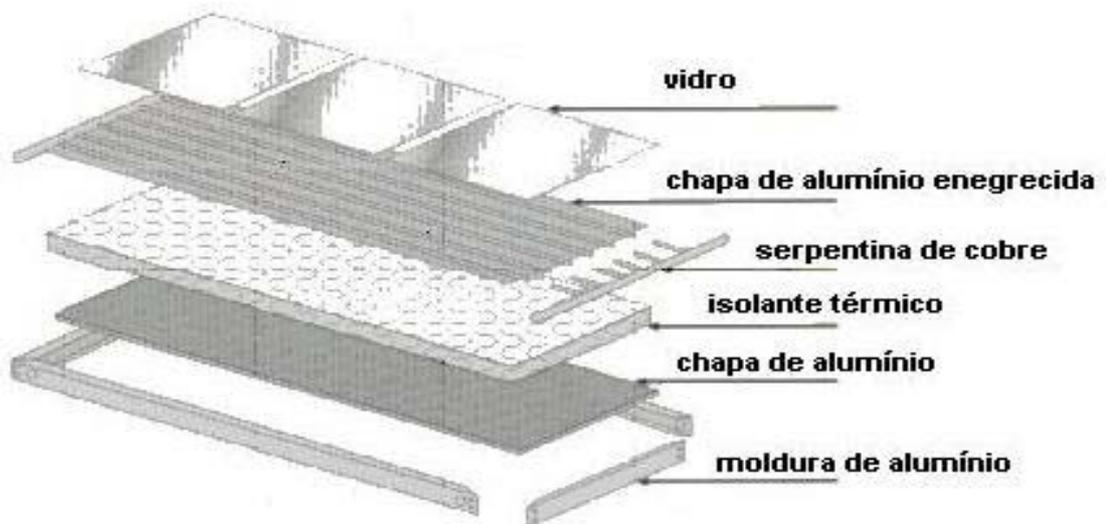


Figura 1 – Componentes básicos de um coletor solar tipo placas

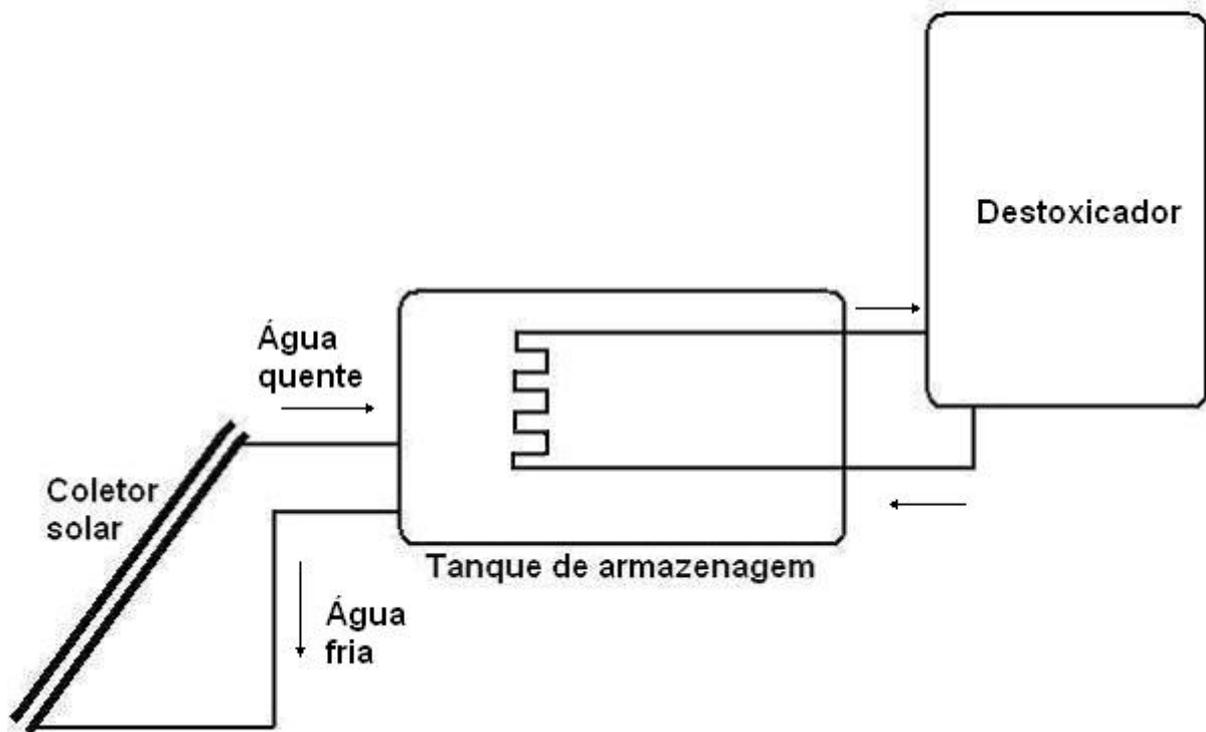


Figura 2 – Esquema com componentes de um aquecedor solar de água para destoxicação da torta de mamona

Um modelo matemático para verificação de suposições sobre o sistema seria atribuído às equações que descrevem a troca de energia térmica entre o tanque de armazenagem e a água em circulação, vindo do coletor de energia solar. Dessa forma tem-se:

- calor estocado no tanque de estocagem,

$$Q_e = W_e C_v T_e \quad (2.1)$$

- taxa de calor chegando ao tanque, vindo do aquecedor,

$$\dot{Q}_{in} = \dot{W}_{in} C_v T_{in} \quad (2.2)$$

Admitindo que não existem perdas de calor no tanque de estocagem, nem cargas a serem supridas, a taxa de calor saindo do tanque com a água que vai para o aquecedor solar é:

$$\dot{Q}_{out} = \dot{w}_{out} C_v T_{out} \quad (2.3)$$

Dessa forma,

- taxa de calor acumulado no tanque de estocagem,

$$\dot{Q}_{ac} = \dot{w}_{ac} C_v (T_{in} - T_{out}) \quad (2.4)$$

Admitindo-se, agora, que a troca de calor passa-se em condições ideais, isto é,  $T_{out} = T_e$ , então o acúmulo de calor no tanque é dado por:

$$\dot{Q}_{ac} = \dot{w}_{ac} C_v (T_{in} - T_e) \quad (2.5)$$

A temperatura do tanque aumenta de acordo com o calor acumulado,

$$W_e C_v \frac{dT_e}{dt} = \dot{w}_{in} C_v T_{in} - \dot{w}_{out} C_v T_e \quad (2.6)$$

Cancelando  $C_v$ , fazendo-se uma suposição razoável de que a massa em circulação do aquecedor para o tanque de estocagem e vice-versa, é constante, ou seja,  $\dot{w} = \dot{w}_{in} = \dot{w}_{out}$  e dividindo a Equação (2.6) por  $W_e$ , chega-se a:

$$\frac{dT_e}{dt} + \frac{\dot{w}}{W_e} T_e - \frac{\dot{w}}{W_e} T_{in} = 0 \quad (2.7)$$

A Equação (2.7) constitui-se, assim, num modelo preliminar (Modelo M1) e uma base para a implementação de modelos mais complexos.

Uma visão mais realística do processo abordado aponta para um contato entre o tanque de estocagem e o duto por onde a água é levada para o extrator de destoxicação. Como o duto por onde percorre essa água encontra-se a uma temperatura diferente da temperatura em que se encontra a água no tanque de estocagem, pode-se admitir que o referido sistema adicional seja considerado como uma carga. Daí:

- calor estocado no tanque de destoxicação,

$$Q_d = W_d C_p T_d \quad (2.8)$$

- calor chegando para o tanque de destoxicação,

$$Q_{ind} = \dot{w}_{ind} C_v T_{ind} \quad (2.9)$$

- calor saindo do tanque de destoxicação, de volta para o de estocagem, admitindo-se que não existe perda de calor,

$$Q_{outd} = \dot{w}_{outd} C_v T_{outd} \quad (2.10)$$

- taxa de acúmulo de calor no tanque de destoxicação,

$$\dot{Q}_d = \dot{w} C_p (T_{ind} - T_{outd}) \quad (2.11)$$

Dessa forma, a variação de temperatura na carga é,

$$W_d C_p \frac{dT_d}{dt} + \dot{w} C_v T_d - \dot{w} C_v T_e = 0 \quad (2.12)$$

Assim,

$$\frac{dT_d}{dt} + \frac{\dot{w}C_v}{W_d C_p} T_d - \frac{\dot{w}C_v}{W_d C_p} T_e = 0 \quad (2.13)$$

Admitindo-se, agora, que existe uma perda de energia calorífica para manter a temperatura na carga, chega-se a um novo balanço de energia para o tanque de estocagem:

$$\frac{dT_e}{dt} + \frac{(\dot{w}_{ind} + \dot{w}_{ine})}{W_e} T_e - \frac{\dot{w}_{ine}}{W_e} T_{ine} - \frac{\dot{w}_{ind}}{W_e} T_d = 0 \quad (2.14)$$

As Equações (2.13) e (2.14) constituem-se em um modelo denominado M2.

Considere-se, agora, que a forma de troca de calor é do tipo indireto (INCROPERA & DEWITT, 1999), com a água circulando entre o aquecedor solar e o tanque de estocagem, fornecendo calor para o aquecimento deste último. A temperatura no tanque varia com o tempo.

Um balanço de energia sobre o trocador dentro do tanque de estocagem mostra que:

$$W_{outt} C_v \frac{dT_{outt}}{dt} = \dot{w} C_v (T_{int} - T_{outt}) - K_{te} (T_{outt} - T_{int}) \quad (2.15)$$

no qual  $K_{te}$  é o coeficiente de troca térmica entre o trocador e o tanque de estocagem. Da mesma maneira, pode-se obter um balanço de energia para o tanque de estocagem:

$$W_e C_v \frac{dT_e}{dt} = K_{te} (T_{outt} - T_e) - K_p T_e \quad (2.16)$$

no qual  $K_p$  é o coeficiente de perdas térmicas do tanque e as Equações (2.15) e (2.16) dão origem ao modelo M3.

### **2.2.2 Simulação computacional**

Os modelos computacionais foram desenvolvidos em com auxílio do toolbox Simulink do Matab (CHAPMAN, 2002). O Simulink é uma ferramenta específica para simulação e análise dinâmica de processos e pode ser utilizado para análises de sistemas lineares e não-lineares, modelados como sistemas contínuos no tempo, ou discretos no tempo. O Simulink possui ainda interface gráfica para construção de modelos por meio de diagramas de blocos, além de permitir que partes do modelo, principalmente quando esses modelos tornam-se grandes e complexos, possam ser divididos em subsistemas hierárquicos, com abstração dos detalhes do software.

Os modelos foram elaborados de forma progressiva em relação às suas complexidades. Primeiro foi elaborado o mais simples, modelo de um tanque apenas, modelo 1 (Figura 3). Em segundo lugar foi elaborado o modelo 2, o qual admite a existência de uma carga ligada ao tanque de estocagem de água (Figura 4). Por último vem o modelo 3 (Figura 5), o qual considera a existência de um trocador de calor não ideal no interior do tanque de estocagem, como mecanismo de troca térmica entre o referido tanque e o aquecedor solar. Tanto o modelo 2 como o modelo 3 estão representados com auxílio da técnica de transformação de suas principais etapas em blocos de subsistemas.

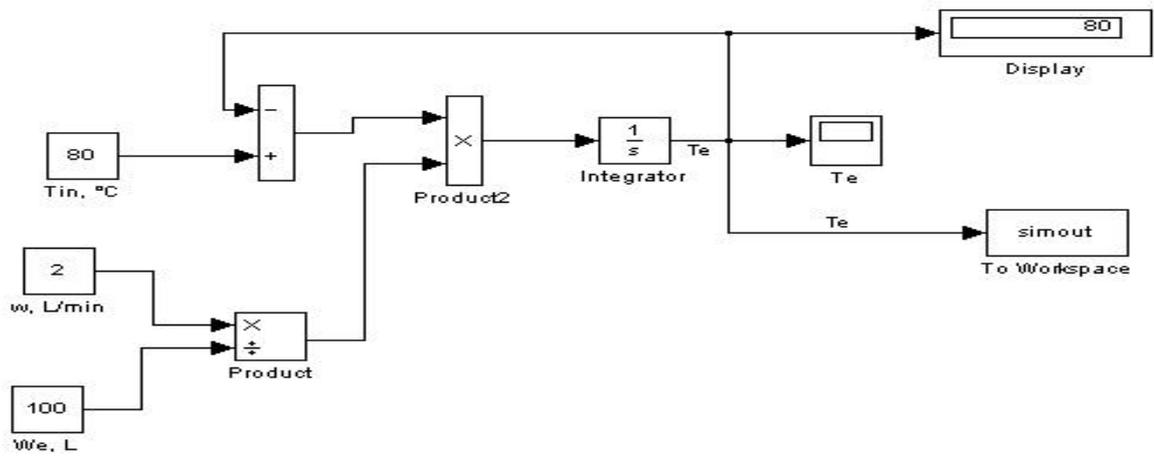


Figura 3 – Modelo M1 em Simulink/Matlab

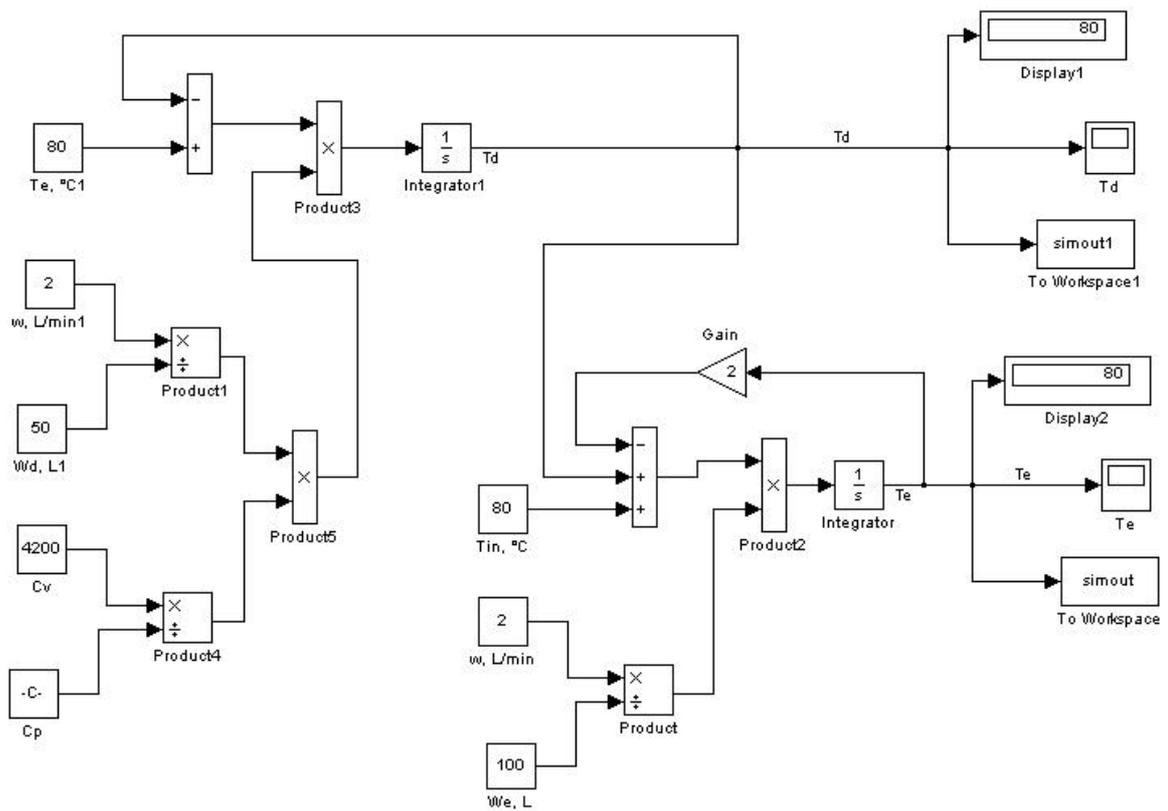


Figura 4 – Modelo M2 em Simulink/Matlab

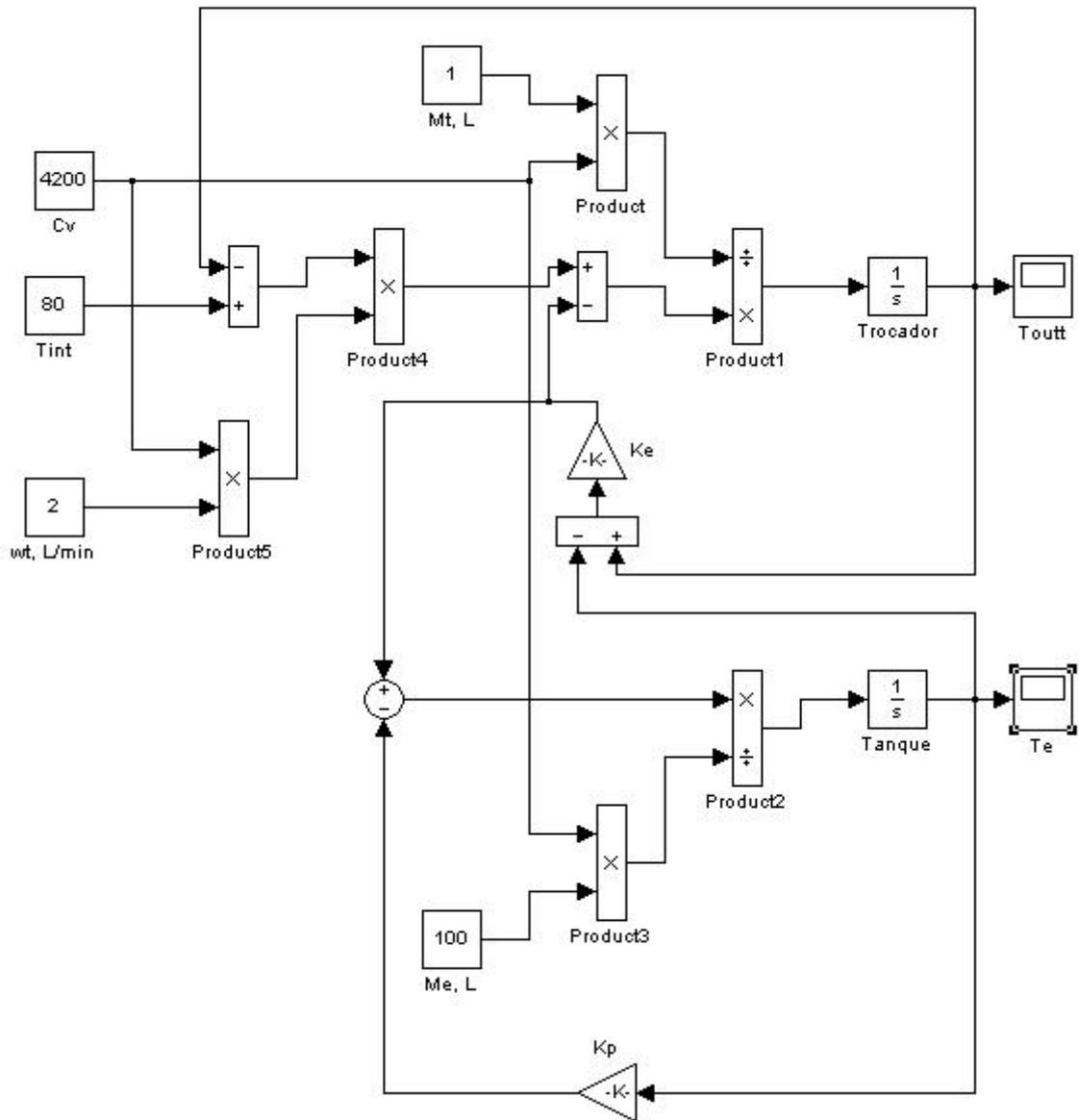


Figura 5 – Modelo 3 em Simulink/Matlab com entrada tipo degrau

## 2.3 Resultados e Discussão

Para simulação dos modelos foram adotados valores numéricos relativos a uma instalação do tipo piloto de um sistema de aquecimento de água e do destoxicador. Neste caso foram adotados os seguintes valores, com base num volume do tanque de estocagem da ordem de 100 litros (Tabela 3.1):

Tabela 2.1 – Parâmetros de entrada dos programas de simulação

Parâmetro	Valor	Unidade
$W_e$	100	L
$\dot{w}$	2	L/min
$W_t$	1	L/min
$C_v$	4200	J/(kg·°C)
$C_p$	4225	J/(kg·°C)
$K_{te}$	0,75	J/(min·°C)
$K_p$	3,33	J/(min·°C)

A resposta do modelo M1 aos parâmetros adotados para o dimensionamento do sistema físico é mostrada na Figura 6. Tais parâmetros foram escolhidos para uma simulação adequada às condições reais de trabalho, como, por exemplo, um volume do tanque de 100 L e uma vazão de circulação de água de 2 L/min (SPIRKL, 1990). Como se pode observar, a resposta do referido modelo apresenta-se como se previa, em que para um degrau de temperatura na entrada, a saída aumenta exponencialmente em relação ao valor do degrau. Isso mostra que a análise matemática aplicada é razoavelmente precisa em relação às suposições adotadas. Contudo, o referido modelo M1 é muito simples para ser adotado por qualquer sistema real, em função dos tipos de simplificações adotadas.

O modelo M2 foi elaborado a partir da inclusão de uma carga (tanque de destoxicação) ao tanque de estocagem do modelo M1, admitindo-se que nesse tanque de estocagem ocorre transferência de calor, uma vez que o duto que se comunica com o tanque de destoxicação atua como essa carga. Novamente os valores dos parâmetros foram mantidos e as propriedades da água calculada com auxílio do **programa apresentado pelo Anexo --**.

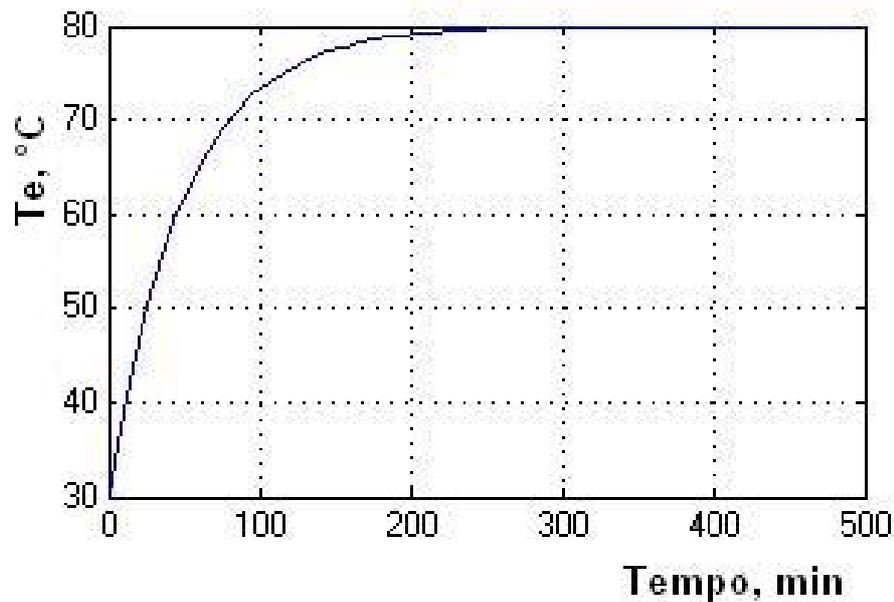


Figura 6 – Variação de temperatura do tanque de estocagem como resposta do modelo M1

As respostas do modelo 2 são mostradas pelas Figuras 7 e 8. Elas ilustram as variações de temperatura no tanque e no duto de vácuo (carga) acima desse tanque, para uma perturbação do tipo degrau correspondente a 1°C. Ambos os comportamentos das temperaturas-resposta são muito similares e mostram um aumento exponencial da temperatura com relação ao degrau de entrada. Isto era esperado, uma vez que se admitiu que nenhum calor era perdido pelo sistema (bom sistema de isolamento térmico). A mesma resposta é mostrada para o tanque de destoxicação. A temperatura do tanque aumenta da mesma maneira que no caso analisado pelo modelo M1.

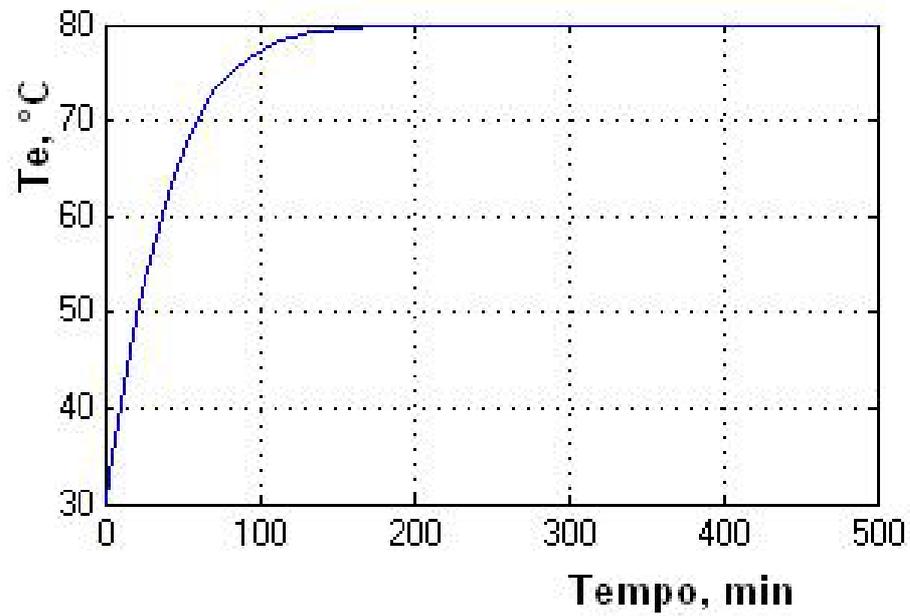


Figura 7 - Variação de temperatura do tanque de estocagem como resposta do modelo M1

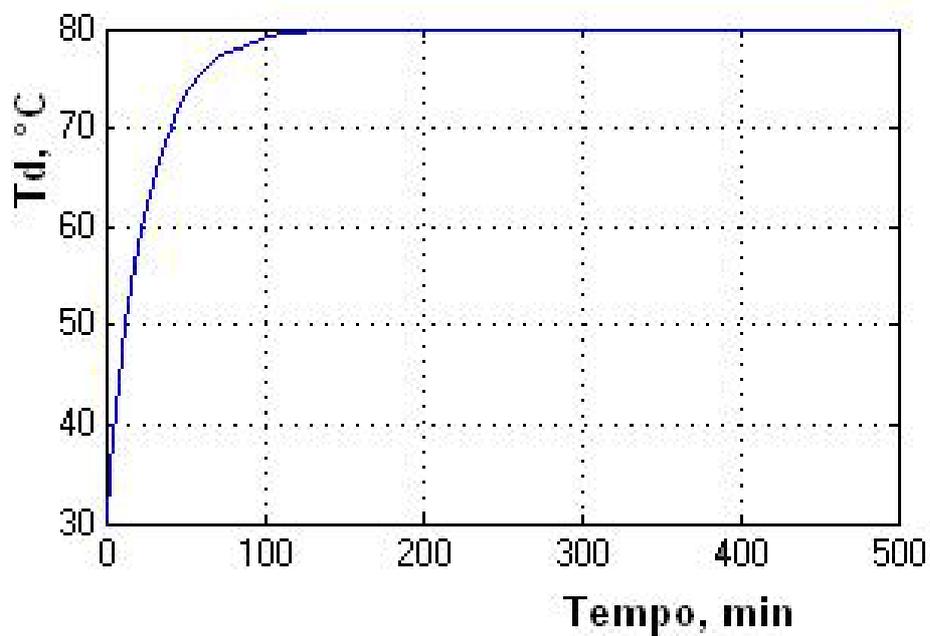


Figura 8 - Variação de temperatura do destoxicador resposta do modelo M2

Os valores dos parâmetros utilizados para o modelo M3 foram idênticos aos do modelo M2, anteriormente apresentado, com acréscimo dos valores de  $K_{et} = 0,75 \text{ J}/(\text{min}\cdot^{\circ}\text{C})$  e  $K_p = 3,33 \text{ J}/(\text{min}\cdot^{\circ}\text{C})$  (INCROPERA & DEWITT, 1999). Tais valores para os referidos parâmetros não são conhecidos e foram estimados com base em valores da literatura (DUFFIE & BECKMAN, 1991). As Figuras 9 e 10 mostram as respostas do modelo para esses parâmetros. A Figura 9 ilustra o comportamento da temperatura na saída do trocador; enquanto que a Figura 10 ilustra esse comportamento no tanque de estocagem. A resposta predita mostra que a temperatura da água na saída do trocador de calor aumenta muito rapidamente em virtude da quantidade de água escoando pelo trocador. A resposta de redução de temperatura no tanque de estocagem mostra que o mesmo possui dimensões suficientes para servir de fonte de armazenagem de calor. Essa redução na sua temperatura, no mesmo intervalo de tempo necessário para aquecer o destoxicador, pode sinalizar a manutenção das proporções adotadas entre os volumes dos componentes do sistema de aquecimento envolvidos.

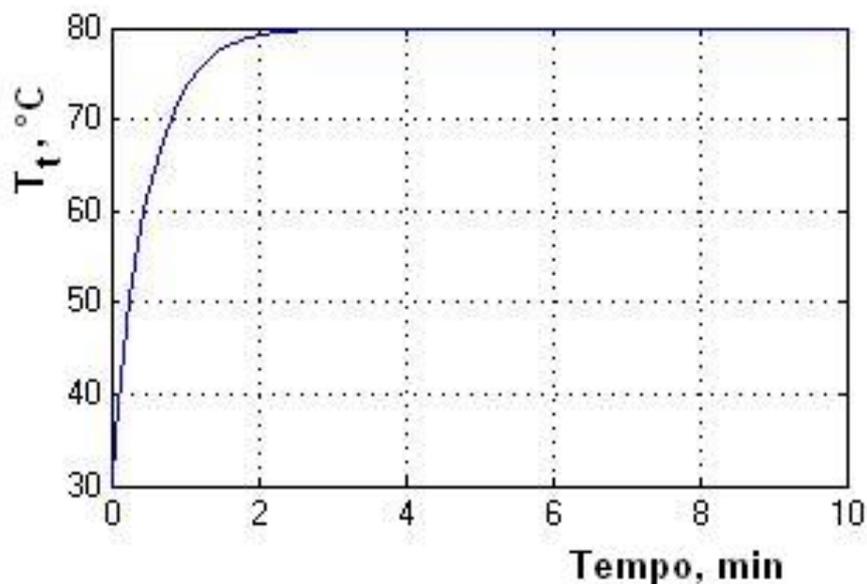


Figura 9 – Temperatura da água na saída do trocador como resposta do modelo M3

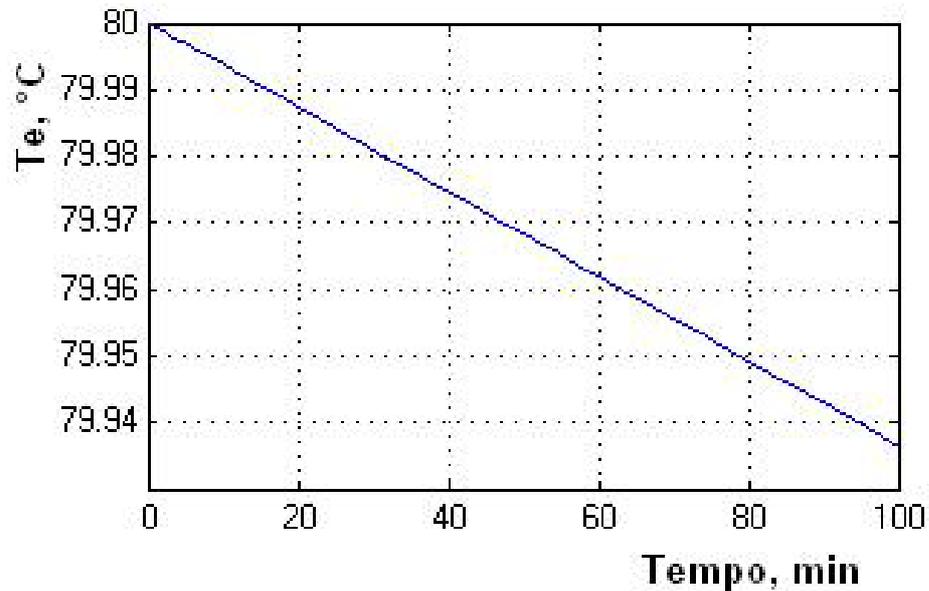


Figura 10 - Temperatura da água no tanque como resposta do modelo M3

## 2.4 Conclusões e Sugestões

O principal objetivo do presente trabalho foi alcançado. Modelos matemáticos dinâmicos que podem gerar uma base de dados para análise, antes da construção do sistema físico foram apresentados. Pode-se pontuar as vantagens trazidas nessa etapa de trabalho como:

- As suposições básicas atribuídas a cada modelo e as respostas dadas pelos mesmos, coincidindo com tais previsões, demonstraram a existência de uma boa compreensão do sistema físico.

- As respostas satisfatórias dos modelos, obtidas nas simulações apresentadas aos valores de entrada impostos aos mesmos - etapa de verificação, mostraram que a ferramenta utilizada para modelagem e simulação dos fenômenos é adequada a este tipo de trabalho.

- A precisão com que os modelos simularão as dinâmicas de importantes etapas do processo de aquecimento solar para a destoxicação da torta de mamona

deverá passar por uma validação, tão logo sejam construídos os protótipos dos componentes do sistema em estudo.

– Modelos mais completos, aproveitando as bases estruturais deixadas pelo presente trabalho, deverão ser implementados ainda na etapa seqüencial ao presente trabalho, onde serão procuradas condições otimizadas para definições de condições operacionais do modelo físico.

## 2.5 Referências

ANADAN, A.; KUMAR, G. K. A.; GHOSH, J.; RAMACHANDRA, K. S. Effect of different physical and chemical treatments on detoxication of ricin in castor cake. **Animal Feed Science and Technology**, n.120, p.159-168, 2005.

BEZERRA, A. M. **Aplicações térmicas da energia solar**. 4º ed. João Pessoa: Editora Universitária, 150p, 2001.

CHAPMAN, S. J., **Programação em MATLAB para Engenheiros**, São Paulo: Editora Thompson, 2002.

DUFFIE J.A.; BECKMAN J.A., **Solar Engineering of Thermal Processes**. New York: John Wiley and Sons, 1991.

INCROPERA, F. P. ; DEWITT, D. P., **Fundamentals of heat and mass transfer**. 4th ed. New york: John Wiley & Sons, 1999.

LOBO, I. P.; XAVIER, G.S.; ALMEIDA NETO, J.A.; TEIXEIRA, L.S.G.; PARENTE JUNIOR, E. S.; OLIVEIRA, A. M.; CRUZ, R.S. Produção de biodiesel a partir do óleo de mamona em planta piloto. In: **I Congresso da Rede Brasileira de Biodiesel**, Brasília, DF, p. 263-268, 2006.

MATSUMOTO, E. Y., **MATLAB 7 – Fundamentos**, 1ª ed., São Paulo: Editora Érica, 2004.

OGUNNAIKE, B.A., RAY, W.H., **Process Dynamics, Modeling and Control**, New York: Oxford University Press, 1994.

RIBEIRO, W. C., **A Ordem Ambiental Internacional**, São Paulo: Editora Contexto, 228 p, 2001.

SPIRKL, W., Dynamic solar domestic hot water testing. ASME. **J. Solar Energy Engineering**, n.112, p.98-101, 1990.

TORRES, A. C.; CARNEIRO, R. A. F. A importância dos co-produtos para a viabilidade técnica e econômica da cadeia produtiva do biodiesel. In: **I Congresso da Rede Brasileira de Biodiesel**, Brasília, DF, p. 3-13, 2006.











Área(s):

***Ciências Ambientais***

***Ecologia***

***Farmacologia. Toxicologia***

***Ciências da Saúde (Geral)***

***Medicina (Geral)***

***Saúde Coletiva***

***Ciências Agrárias (Geral)***

***Engenharia Química***

***Engenharia Sanitária***

Tipo de Material: ***Periódicos com texto completo***

Forma de Aquisição: ***Assinado***

Analisado JCR 2005: ***sim*** Fator de Impacto: ***2.324*** (JCR-2005)

Editor/distribuidor: ***Science Direct Online*** ISSN: ***0013-9351***

Período disponível: ***1993 - presente***

## PROGRAMA DE CÁLCULO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA ÁGUA E DO AR - EM MATLAB

```

% Programa "pftwar2" para cálculos de propriedades
% físicas e termodinâmicas da água e do ar
clear
% Entrada de dados:
Tcw=647.3;           % temperatura crítica da água   K
Pcw=22120;          % pressão crítica da água   kPa
Mw=18.016;          % Massa molecular da água   mol-kg
Ma=28.966;          % massa molecular do ar     mol-kg
Tca=132.52;         % temperatura crítica do ar  K
Pca=3766;           % pressão crítica do ar     kPa
R=8.3144;           % constante universal dos gases kJ/kmol.K
a0=9.99034e+2; a1=3.20159e-1; a2=-2.34613e-2; a3=4.16153e-4;
a4=-4.50339e-6; a5=2.76448e-8; a6=-9.58655e-11; a7=1.74041e-13;
a8=-1.30803e-16; c0=1.69111e-5; c1=4.98424e-8; c2=-3.18702e-11;
c3=1.31965e-14; b0=1.7469e-3; b1=-5.20067e-5; b2=8.80387e-7;
b3=-7.7723e-9; b4=2.70409e-11; b5=6.43668e-4; b6=-5.24429e-6;
b7=1.76199e-8; b8=-2.09322e-11; d0=4.15707; d1=5.78841e-3; d2=-1.81792e-4;
d3=1.94450e-6; d4=-8.05945e-9; d5=1.19297e-11; e0=1.00926; e1=-4.04033e-5;
e2=6.17596e-7; e3=-4.09723e-10; f0=5.71177e-1; f1=1.75115e-3;
f2=-6.81249e-6; f3=2.10840e-9;
g1=1.320227345; g2=-2.485904388; g3=1.517081933; q1=5.4408480; q2=-2005.1;
q3=1.3869e-4; q4=-4.4e-3; q5=-5.7148e-3;
q6=1.1965e-11; m0=2.42503e-2; m1=7.88913e-5; m2=-1.79034e-8;
m3=-8.57050e-12;
t=input('Entre com a temperatura do processo, °C ');
t2=t*t; t3=t2*t; t4=t3*t; t5=t4*t; t6=t5*t; t7=t6*t; t8=t7*t;
pt=input('Entre com a pressão absoluta do processo, N/m2 ');
%+++++
%
%+++++ Inicialização dos Cálculos +++++
%
%Massa Específica (kg/m3):
row=a0+a1*t+a2*t2+a3*t3+a4*t4+a5*t5+a6*t6+a7*t7+a8*t8;
pro=pt/1000;
T=273.15+t;
B=-0.0407+13.116*(1/T)+1.2e+5*(1/T^3);
roa=pro*Ma/(R*T-B*pro);
%+++++
%
%Viscosidade (kg/(m.s)):
if(t>100)
    miw=c5+c6*t+c7*t2+c8*t3;
else
    miw=c0+c1*t+c2*t2+c3*t3+c4*t4;
end
mia=b0+b1*t+b2*t2+b3*t3;
%+++++
%
%Capacidade calorífica, (kJ/(kg.K)):
cpw=d0+d1*t+d2*t2+d3*t3+d4*t4+d5*t5;
cpa=e0+e1*t+e2*t2+e3*t3;
%+++++
%
%Condutividade Térmica (W/(m.K)):

```

```

if (t>350)
    disp ('Valor de temperatura acima do mínimo permitido');
else
    Ctw=f0+f1*t+f2*t2+f3*t3;
    Cta=s0+s1*t+s2*t2+s3*t3;
end
%+++++Resultados+++++
disp (['Massa específica da água, kg/m3 : ' num2str(row)]);
disp (['Massa específica do ar, kg/m3 : ' num2str(roat)]);
disp (['Viscosidade da água, kg/(m.s) : ' num2str(miwat)]);
disp (['Viscosidade do ar, kg/(m.s): ' num2str(miat)]);
disp (['Capacidade calorífica da água, kJ/(kg.K) : ' num2str(cpwat)]);
disp (['Capacidade calorífica do ar, kJ/(kg.K) : ' num2str(cpaa)]);
disp (['Condutividade térmica da água, W/(m.K) : ' num2str(Ctw)]);
disp (['Condutividade térmica do ar, W/(m.K): ' num2str(Cta)]);

```