

# Projeto e Simulação de uma Unidade de Extração de Óleo Essencial de Eucalipto

Alexandre Salgado Reis Peçanha  
Raissa Caputo Domingues da Silva

**Projeto de Final de Curso**

**Orientadores**

Prof. Dr. Carlos Augusto G. Perlingeiro  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Maria José de O. C. Guimarães

Agosto de 2009

# PROJETO E SIMULAÇÃO DE UMA UNIDADE DE EXTRAÇÃO DE ÓLEO ESSENCIAL DE EUCALIPTO

*Alexandre Salgado Reis Peçanha*

*Raissa Caputo Domingues da Silva*

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

---

Arthur R. Menzel – Químico Industrial

---

Fernando Luiz Pellegrini Pessoa – D.Sc.

---

Mário Sérgio O. de Castro – Engenheiro Químico

Orientado por:

---

Carlos Augusto G. Perlingeiro – D.Sc.

---

Maria José de O. C. Guimarães – D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Agosto de 2009

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

Peçanha, Alexandre S.R., da Silva, Raissa C.D.

Projeto e Simulação de uma Unidade de Extração de Óleo Essencial de Eucalipto/Alexandre Salgado R. Peçanha, Raissa Caputo D. da Silva. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2009.

viii, 49 p.; il.

(Projeto de Final de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2009.

Orientadores: Carlos Augusto G. Perlingeiro e Maria José de O.C. Guimarães.

1. Óleos Essenciais. 2. Modelos de Rede. 3. Modelagem Estocástica. 4. Projeto de Final de Curso. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Carlos Augusto G. Perlingeiro, Maria José de O.C. Guimarães. I. Projeto e Simulação de uma Unidade de Extração de Óleo Essencial de Eucalipto.

## **DEDICATÓRIA**

Aos pais, que tanto nos apoiaram, se esforçaram e abdicaram de muitas coisas para nos proporcionar a melhor educação possível.

“A melhor maneira de prever o futuro é criá-lo”.

Peter Drucker

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Departamento de Processos Orgânicos e Departamento de Engenharia Bioquímica da Escola de Química/UFRJ pelo uso dos respectivos laboratórios de graduação.

Ao Laboratório de Compostos Fitoterápicos da Fiocruz pelos ensaios de cromatografia tão importantes para este trabalho.

Ao programa de graduação em Engenharia Química da UFRJ pelos conhecimentos transmitidos através de seus professores.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, principalmente, a Arthur R. Menzel pelas sugestões sobre óleos essenciais e ao professor Fernando Luiz Pellegrini Pessoa pelo suporte na estimação de propriedades termodinâmicas.

E, em especial, aos professores Carlos Augusto G. Perlingeiro e Maria José de O.C. Guimarães por sua orientação, total apoio e estímulo.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

## **PROJETO E SIMULAÇÃO DE UMA UNIDADE DE EXTRAÇÃO DE ÓLEO ESSENCIAL DE EUCALIPTO**

Alexandre Salgado Reis Peçanha  
Raissa Caputo Domingues da Silva

Agosto, 2009

Orientadores: Carlos Augusto G. Perlingeiro  
Maria José de O.C. Guimarães

Foi estudado um método estocástico de passeadores aleatórios para simulação do processo de extração de óleo essencial de eucalipto por arraste de vapor, usando uma abordagem baseada em redes correlacionadas complexas e uma metodologia de quantização do solvente. Este estudo propõe um procedimento que permite estimar variáveis de processo e rendimento de produto a partir da matéria-prima disponível.

No método proposto, foi utilizado o modelo de rede de Mathews para gerar uma distribuição de tamanho de caminhos médios em um meio poroso constituído pelas folhas de eucalipto na dorna de destilação, enquanto que a quantização do solvente foi empregada para simular os fenômenos de transferência de massa do processo de extração.

No presente trabalho, foi necessário implementar métodos de construção de rede de Mathews, metodologia de passeadores aleatórios, procedimento para estimação de propriedades termodinâmicas e do coeficiente de difusão das espécies envolvidas, e ainda foram conduzidos estudos laboratoriais para medição de propriedades estruturais do meio poroso. Além disso, o comportamento PVT foi estimado pela equação de Peng-Robinson com regra de mistura clássica e os fenômenos de transporte de massa foram simulados com metodologia da literatura, e ambos implementados pelos autores.

Foi verificado com dados experimentais de escala de bancada e piloto e com dados da literatura com relação à escala industrial que o procedimento proposto é satisfatório. Verificou-se, adicionalmente, que o *scale-up* utilizando a metodologia proposta conduz a desvios reduzidos sem acréscimo significativo na demanda computacional.

Outrossim, foi possível estimar custos de implementação de uma planta para a extração de óleo essencial de eucalipto e com isso, fazer um paralelo entre dois cenários distintos do ponto de vista de um pequeno agricultor. O estudo mostrou que a plantação de eucalipto visando a produção de óleo essencial é economicamente viável, além de ter apresentado maior retorno para o pequeno agricultor em relação à cultura madeireira vigente.

## ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 MOTIVAÇÃO.....   | 1         |
| 1.2 OBJETIVOS .....  | 2         |
| <b>CAPÍTULO 2: ÓLEOS ESSENCIAIS.....</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1 INTRODUÇÃO.....  | 3         |
| 2.2 DEFINIÇÕES BÁSICAS SOBRE ÓLEOS ESSENCIAIS .....  | 3         |
| 2.3 O PROCESSO DE MANEJO FLORESTAL DO EUCALIPTO .....  | 5         |
| 2.4 O PROCESSO DE EXTRAÇÃO DO ÓLEO ESSENCIAL DE EUCALIPTO.....   | 6         |
| <b>CAPÍTULO 3: ESTUDOS EXPERIMENTAIS.....</b>  | <b>8</b>  |
| 3.1 EXTRAÇÃO DE ÓLEO ESSENCIAL POR ARRASTE DE VAPOR EM ESCALA DE BANCADA .....   | 8         |
| 3.2 ENSAIO DE DENSIDADE DA FOLHA DE <i>EUCALYPTUS CITRIODORA</i> .....   | 10        |
| 3.3 ENSAIO DE EMPACOTAMENTO.....   | 11        |
| 3.4 MEDIÇÃO DA ESPESURA MÉDIA DAS FOLHAS .....   | 11        |
| 3.5 MEDIÇÃO DA QUANTIDADE MÉDIA DE CÉLULAS PRODUTORAS DE ÓLEO POR CENTÍMETRO QUADRADO.....                                 | 11        |
| 3.6 ENSAIO DE COMPOSIÇÃO DO ÓLEO.....  | 11        |
| 3.7 EXTRAÇÃO DE ÓLEO ESSENCIAL DE EUCALIPTO POR ARRASTE DE VAPOR EM ESCALA PILOTO .  | 12        |
| 3.7.1 <i>Projeto da Planta Piloto</i> .....  | 12        |
| 3.8 MEDIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO MÉDIA DE TAMANHOS DAS FOLHAS RETIRADAS DA ÁRVORE.....  | 13        |
| <b>CAPÍTULO 4: MODELO PARA ESTUDO DA EXTRAÇÃO DE ÓLEO ESSENCIAL .....</b>  | <b>15</b> |
| 4.1 INTRODUÇÃO.....  | 15        |
| 4.2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO DO MODELO .....  | 15        |
| 4.2.1 <i>Modelo de Rede</i> .....  | 15        |
| 4.2.2 <i>Abordagem da Pérola de Vapor</i> .....  | 17        |
| 4.2.3 <i>A Transferência de Massa</i> .....  | 18        |
| 4.2.4 <i>Cálculo de Propriedades</i> .....   | 18        |
| 4.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....   | 18        |
| 4.3.1 <i>Propriedades Críticas</i> .....   | 19        |
| 4.3.2 <i>Pressão de Saturação</i> .....  | 20        |
| 4.3.3 <i>Coefficientes de Difusão</i> .....  | 20        |
| 4.3.4 <i>Ensaio Computacional de Extração de Óleo Essencial de Eucalipto</i> .....   | 21        |
| <b>CAPÍTULO 5: ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROJETO.....</b>  | <b>31</b> |
| 5.1 ANÁLISE DO IMPACTO DA PRODUÇÃO DE ÓLEO ESSENCIAL SOBRE A CULTURA DO EUCALIPTO: O PONTO DE VISTA DO AGRICULTOR. ....    | 31        |
| 5.2 ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLANTA DE EXTRAÇÃO DE ÓLEO ESSENCIAL DE EUCALIPTO: O PONTO DE VISTA DO INVESTIDOR..... | 39        |
| <b>CAPÍTULO 6: DISCUSSÕES FINAIS .....</b>   | <b>46</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>47</b> |



# Capítulo 1: Introdução e Objetivos

## 1.1 Motivação

O estudo dos óleos essenciais é bastante vasto na literatura, entretanto, tal vastidão é focada no estudo de fitoterápicos, botânicos ou de engenharia de produto. Sob o ponto de vista da engenharia de processo e produção, o estado da arte da tecnologia brasileira encontra-se no mesmo patamar dos anos 60, quando houve uma intensificação da produção de óleos essenciais no Brasil, na região do Pará, e tendo como produto alvo o óleo de Pau-Rosa.

A maior parte da tecnologia disponível no País para extração de óleo se baseia em *know-how* internacional, ou em técnicas de extração que ainda não possuem aplicabilidade industrial para mais de 90% dos óleos produzidos em território nacional (como a tecnologia supercrítica, por exemplo). Exceção deve ser feita à produção de óleo essencial de laranja e limão, onde o Brasil é referência mundial.

Neste contexto, a motivação deste trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo confiável de produção de óleo essencial de eucalipto – um dos maiores potenciais que podem ser explorados no país – sob um ponto de vista um pouco diferente da concepção normal. Além disso, serão determinadas as condições operacionais ideais para a produção deste óleo, considerando como possível recurso para a montagem da planta, o incentivo de investidores externos como o BNDES ou o Banco do Brasil, e ainda a universidade pública como fonte de *know-how* e tecnologia.

O produto final primário, deste projeto, é, portanto, a proposição de todo um conhecimento tecnológico, do ponto de vista de engenharia de processo, para a produção de óleo essencial de *Eucalyptus citriodora*. O projeto ainda possui três produtos finais secundários de importância intangível. São eles:

Diminuição das carvoarias e madeireiras ilegais: uma vez que o eucalipto produzido para a produção de óleos essenciais inviabiliza o uso da madeira para madeireiras e produção ilegal de carvão para uso comercial, o que, entretanto, não inviabiliza o seu uso em caldeiras industriais como combustível. Este fato, indiretamente, poderá reduzir as taxas de trabalho infantil e escravo nas comunidades e poderá, ainda, absorver a mão-de-obra adulta de forma legalizada, uma vez que a produção de óleo essencial de eucalipto demanda muita mão-de-obra humana.

Renda extra para comunidades agrícolas de subsistência: a cultura do eucalipto é bastante comum no meio rural de baixa renda, principalmente no estado de Minas Gerais, São Paulo e Goiás. Entretanto, o destino deste material quase sempre está sujeito ao preço do mercado negro das carvoarias e madeireiras ilegais. Uma mudança de destinação do produto para a cultura de óleos essenciais sob a forma de cooperativa, permite que o produto oferecido possua maior valor agregado, com um investimento relativamente modesto em material e sem maiores alterações da cultura produtiva já existente. O diferencial básico é que o retorno sobre o investimento na cultura de eucalipto se dará anualmente, ao contrário do que ocorre na cultura tradicional com fins madeireiros onde o retorno do investimento só se dá após no mínimo seis anos.

Venda de créditos de carbono: a plantação de grandes áreas de eucalipto permite a venda de créditos de carbono, o que pode não ser uma solução definitiva para o seqüestro de CO<sub>2</sub>, mas é a melhor iniciativa em anos. Vale ressaltar que uma cultura de eucalipto para

produção de óleos essenciais possui uma produção de biomassa quase quatro vezes maior que a produção para cultura madeireira.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho teve como objetivo geral o desenvolvimento de um modelo matemático para o processo de extração de óleo essencial de *E. citriodora* com a tecnologia de extração por arraste de vapor. Posteriormente, os dados fornecidos por este modelo serão utilizados para determinação dos custos associados à implementação do projeto.

Os objetivos específicos foram:

- Obter curvas cinéticas de extração em laboratório.
- Medir propriedades de empacotamento, densidade e dimensões, tanto do sistema de extração (óleo + água, folhas + água, folhas + ar), como das próprias folhas.
- Com base nos estudos de bancada fazer um *scale-up* do processo para uma planta piloto com capacidade aproximada de 10 kg de folhas por batelada.
- Estimar os custos associados à implementação do projeto pelo modelo desenvolvido.

Este projeto está estruturado em 6 capítulos. No capítulo 2, são fornecidos os fundamentos teóricos dos óleos essenciais. No capítulo 3, são discutidos os experimentos conduzidos em escala de bancada e piloto. No capítulo 4, são fornecidos o embasamento teórico para a modelagem, e descritos os experimentos e procedimentos para a estimação de propriedades e parâmetros necessários à simulação. Neste mesmo capítulo, encontram-se os ensaios computacionais de simulação do processo. No capítulo 5, encontram-se os estudos de viabilidade econômica do processo e da implantação da cultura de *E. citriodora*. No capítulo 6, é apresentada uma breve discussão dos resultados.

# Capítulo 2: Óleos Essenciais

## 2.1 Introdução

O conhecimento sobre óleos essenciais de plantas data desde alguns séculos antes da era cristã. As referências históricas de obtenção e utilização destes óleos estão ligadas, originalmente, aos países orientais, com destaque para o Egito, Pérsia, Japão, China e Índia.

A evolução de conhecimentos técnicos sobre os óleos essenciais deu-se em meados do século XVIII, quando se iniciaram os estudos para suas caracterizações químicas. Atualmente, é bastante grande o número de plantas conhecidas para a produção de óleos essenciais em bases econômicas. Tal ocorrência vai desde plantas rasteiras, como é o caso da hortelã, até plantas de porte arbóreo, como é o caso do eucalipto.

O interesse do homem pelos óleos essenciais está baseado na possibilidade de obtenção de compostos aromáticos, os quais, de uma forma ou de outra, fazem parte do dia a dia. Muitos desses compostos são atualmente obtidos sinteticamente seja por razões econômicas, por dificuldades na continuidade da obtenção de plantas produtoras, ou mesmo pelo interesse na obtenção de novos componentes aromáticos. Contudo, a busca pelo o que é natural tem feito crescer a demanda pelos produtos originais obtidos diretamente das plantas. Além do mais, há dificuldades para que os aromas sintéticos se aproximem da perfeição dos aromas naturais [1].

## 2.2 Definições Básicas sobre Óleos Essenciais

Os óleos essenciais, também conhecidos como óleos voláteis, óleos etéreos ou simplesmente essências, são definidos pela International Organization for Standardization (ISO) como produtos obtidos de partes das plantas, através de destilação por arraste com vapor d' água, bem como produtos obtidos pela ação de espremer os pericarpos de frutos cítricos. São misturas complexas de substâncias voláteis, lipofílicas, geralmente odoríferas e líquidas. As denominações dadas a estes óleos são devidas às suas características físico-químicas. São considerados óleos por serem, geralmente, líquidos de aparência oleosa à temperatura ambiente; por apresentarem volatilidade, recebem ainda o nome de óleos voláteis; e são chamados de essências, devido ao aroma agradável e intenso da maioria dos seus representantes. A denominação óleos etéreos é referente ao fato dos mesmos serem solúveis em solventes orgânicos apolares, como o éter.

Outras características que podem ser identificadas nos óleos essenciais são:

Sabor: geralmente acre (ácido) e picante;

Cor: quando extraídos, os óleos são geralmente incolores ou ligeiramente amarelados; poucos são aqueles que apresentam cor, como o óleo volátil de camomila, que tem coloração azulada;

Estabilidade: normalmente os óleos essenciais são instáveis, principalmente na presença de ar, luz, calor, umidade e metais.

A maioria dos óleos essenciais possui índice de refração e são opticamente ativos, propriedade esta usada na sua identificação e controle de qualidade.

Uma gama bastante ampla de constituintes químicos pode ser identificada nos óleos essenciais, havendo referências da presença de hidrocarbonetos terpênicos, álcoois simples e terpênicos, aldeídos, cetonas, fenóis, éteres, óxidos, peróxidos, furanos, ácidos orgânicos, lactonas, cumarinas, etc. Entre os constituintes do óleo essencial, alguns apresentam maior concentração e são conhecidos como componentes principais.

Aqueles que se apresentam em baixíssimas concentrações são conhecidos como componentes traço. Como exemplo, temos o 1,8-cineol ou eucaliptol, que é o componente principal do óleo de *Eucalyptus glóbulus*, apresentando concentração média de 80 %, no entanto, este componente também está presente no óleo de bergamota como componente traço, com concentração em torno de 0,002 %. O componente principal é o constituinte desejado e o fator pelo qual ocorre a exploração econômica das plantas produtoras de óleo.

Os óleos das folhas de eucalipto são formados por uma complexa mistura de componentes, envolvendo de 50 a 100 (ou até mais) compostos orgânicos voláteis, dentre os quais se destacam hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, cetonas, ácidos e ésteres.

Os óleos essenciais são geralmente produzidos por estruturas secretoras especializadas, tais como: pêlos glandulares, células parenquimáticas diferenciadas, canais oleíferos ou em bolsas específicas. Tais estruturas podem estar localizadas em regiões particulares ou em toda a planta. Assim, podemos encontrar os óleos essenciais: na parte aérea, como na menta; nas flores, como é o caso da rosa e do jasmim; nas folhas, como ocorre nos eucaliptos e no capim-limão; nos frutos, como na laranja e no limão; na madeira, como no sândalo e no pau-rosa; nas cascas do caule, como ocorre nas canelas; nas raízes, como se observa no vetiver; nos rizomas, como no gengibre; nas sementes, como na noz-moscada. Os autores comentam ainda que os óleos essenciais obtidos de diferentes órgãos de uma mesma planta podem apresentar composição química, características físico-químicas e odores distintos.

Os óleos essenciais provenientes do eucalipto ocorrem, principalmente, nas folhas, onde são produzidas em pequenas cavidades globulares, chamadas glândulas. Estas se encontram distribuídas em todo parênquima foliar da maioria das espécies de eucalipto. Em algumas espécies, estas glândulas podem ser visualizadas como pequenos pontos translúcidos quando a folha é observada contra a luz. A origem bio-sintética dos óleos essenciais de eucalipto relaciona-se com o seu metabolismo secundário, que não é considerado como fundamental para a manutenção da vida do organismo, porém, confere às plantas a capacidade de adaptação às condições do meio em que vivem. No caso dos eucaliptos, especificamente, as referências são as de que a ocorrência do óleo essencial estaria relacionada com a defesa da planta contra insetos, resistência ao frio quando no estágio de plântulas, ao efeito alelopático e a redução da perda de água, resultados estes que dependem ainda da realização de estudos mais comprobatórios.

Com base nas definições básicas, os óleos essenciais podem ser agrupados segundo a sua função química, como é mostrado na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1:** Principais funções químicas que compõem os óleos essenciais.

| <b>Função Química</b> | <b>Exemplos</b>  |
|-----------------------|--|
| Álcoois               | Linalol, Geraniol, Citronelol, Terpinol, Mentol, Borneol                       |
| Aldeídos              | Citral, Cintronelal, Benzaldeído, Aldeído Cinâmico, Aldeído Cumínico, Vanilina |
| Ácidos                | Benzóico, Cinâmico, Mirístico  |

|                 |  |
|-----------------|--|
| Fenóis          | Eugenol, Timol, Carvacrol                  |
| Cetonas         | Carvona, Mentona, Pulegona, Irona, Cânfora |
| Ésteres         | Cineol, Eucaliptol, Anetol, Safrol         |
| Lactonas        | Cumarina                                   |
| Terpenos        | Pinemo, Limoneno, Felandreno, Cedreno      |
| Hidrocarbonetos | Cimeno, Estireno                           |

**Fonte:** Compilação de [2] e [3].

As matérias-primas, das quais podem ser extraídos os óleos são muitas, podendo ser classificadas em grupos (Tabela 2.2).

**Tabela 2.2:** Principais matérias-primas para produção de óleo essencial.

| <b>Classe</b> | <b>Exemplos</b>  |
|---------------|--|
| Frutos        | Pimentas, Jenipapo   |
| Sementes      | Anis, Carmin, Nós-moscada  |
| Troncos       | Orégano, Cinamon, Canela   |
| Madeiras      | Cânfora, Cedro, Pau-Rosa, Sândalo  |
| Folhas        | Manjeriço, Cinamon, Alecrim, Orégano, Capim-Limão, Patchouli, Hortelã, Eucalipto |
| Resina        | Frankincense, Myrrh  |
| Flores        | Camomila, Jasmim, Rosa, Lavanda, Laranja, Ylang-Ylang                            |
| Pele          | Bergamota, Grapefruit, Limão, Laranja, Tangerina                                 |
| Raízes        | Ginseng  |

**Fonte:** Compilação de [2] e [3].

## 2.3 O Processo de Manejo Florestal do Eucalipto

Os plantios de eucalipto destinados à produção de óleo essencial, em geral, são mais adensados que os utilizados para a produção somente de madeira. Enquanto no primeiro caso as densidades variam entre 3.000 a 8.000 plantas/ha, no segundo, é usual utilizar 1800 árvores/ha. Nas áreas cultivadas para produção de óleo já foram observados os seguintes espaçamentos de plantio: 1 x 1 m, 1,5 x 1,5 m, 2 x 1 m, 3 x 0,75 m, 3,30 x 0,75m, 3 x 1 m, 3 x 1,5 m, 3,9 x 0,5 m.

Considerando uma produção média anual de 6 quilogramas de folhas por planta e um espaçamento de 1 x 1 m, tem-se uma produção estimada em 45 toneladas de folhas/ha ano.

O sistema de manejo tradicionalmente utilizado nos plantios destinados à produção de óleo é o de talhadia, o qual consiste no corte raso da planta e na condução da brotação das cepas. É amplamente usado para o *E. citriodora*, que favorece a realização deste tipo de manejo, pois se trata de uma espécie que apresenta uma boa capacidade de brotação. O sistema tem sido também usado para o *E. staigeriana*, apesar desta espécie ainda ser pouco difundida e testada no País, comparativamente ao *E. citriodora*.

A coleta das folhas, que constitui num processo de desrama artificial, é iniciada normalmente aos 12 meses após o plantio, quando as plantas já se encontram com altura variando de 2 a 4 metros. Na coleta das folhas, retiram-se aproximadamente dois terços da parte inferior da copa das árvores. Este processo é aplicado, geralmente, em intervalos de 12 meses e, dependendo das condições de clima, solo e tratos culturais, o intervalo pode ser reduzido. Normalmente, realiza-se o corte raso aos 6 anos de idade, quando as árvores tornam-se muito altas e a coleta das folhas fica difícil. Com a derrubada das árvores, a coleta é então realizada com a copa no chão. Após o corte raso das árvores faz-se a condução da brotação, deixando-se de 2 a 4 brotos vigorosos por cepa para o reinício da atividade anual de coleta de folhas.

É aconselhável que as coletas de folhas sejam realizadas no período seco, pois, nessa época, o rendimento em óleo é maior, em razão do mais baixo teor de umidade nas folhas [4].

## 2.4 O Processo de Extração do Óleo Essencial de Eucalipto

O processo de extração de óleo essencial é realizado na destilaria, a qual é composta basicamente por: caldeira, dornas, condensador, separador e coletor de óleo.

Os equipamentos da destilaria devem apresentar proporções métricas entre si, desde a capacidade de produção de vapor da caldeira, até o volume do separador de óleo. Faz-se necessário, portanto, o prévio dimensionamento do conjunto, utilizando como base o volume da biomassa a ser destilada, relacionando-a com o tempo de destilação.

A caldeira é responsável pelo fornecimento de vapor utilizado para a extração do óleo essencial. Ela pode ser descrita como uma estrutura que tem em seu interior um conjunto de tubulações por onde ocorre o deslocamento e o aquecimento da água até ser atingido o estado vapor. O vapor produzido na caldeira segue para as dornas onde irá ocorrer a extração do óleo. Em geral, as folhas, depois de destiladas, são denominadas de bagaço e usadas como fonte de energia para caldeira. Cerca de um terço do bagaço gerado é destinado a este fim (os outros dois terços são usados como adubo orgânico).

A dorna é o recipiente onde as folhas serão colocadas para receberem o vapor de destilação. Em função da ação corrosiva do óleo, ela deve ser preferencialmente, construída em aço inoxidável, assim como todos os demais recipientes em que ocorre o contato com o produto destilado. A parte inferior da dorna apresenta formato cônico, sobre o qual existe uma grelha, que tem a função de separar a massa de folhas da entrada de vapor, bem como proporcionar a drenagem da água condensada durante a destilação. Para evitar a perda de óleo, na parte superior da dorna, é utilizado um fecho hidráulico, que consiste em uma canaleta cheia de água, na qual a tampa é colocada. Para um sistema tradicional com uma dorna de capacidade de 2,5 toneladas de folhas, o tempo médio de destilação é de 60 minutos.

O condensador é uma estrutura normalmente cilíndrica, que possui admissão de água fria na sua parte inferior e saída de água quente na sua parte superior. No seu interior existem

diversos tubos imersos em água, dentro dos quais a mistura de vapor d' água e óleo volatilizado é admitida e, em contato com as paredes resfriadas dos tubos, essa mistura é condensada para o estado líquido. A mistura segue para o separador onde, por diferença de densidade, ocorre a separação da água e do óleo (a velocidade de separação de fases é da ordem de 15 mm/min no caso do *E. citriodora* – segundo Coppen [1]). O óleo, mais leve, fica sobrenadante, sendo então a água removida pela parte inferior do separador, onde dependendo da natureza do equipamento pode ser reciclada ao processo ou seguir para o tratamento.

Do separador, o óleo segue para o coletor, onde é feita a sua pesagem, para posterior cálculo de rendimento. O rendimento é a razão entre a quantidade de óleo produzido e a quantidade de folhas destiladas, normalmente expresso em litro de óleo por tonelada de folha.

Antes da armazenagem, o óleo deve ser conduzido a um processo de filtragem e retirada da umidade, para o que pode ser recomendado o uso de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  anidro. Após este processo, o óleo é armazenado e transportado em tambores de 200 litros, preferencialmente, de polietileno ou de latão revestido com epóxi, ou em tanques de aço inoxidável. (Compilação de [1] e [5]).

## Capítulo 3: Estudos Experimentais

Os experimentos em escala de bancada foram conduzidos no Laboratório de Graduação do Departamento de Processos Orgânicos, com material colhido no sítio Nossa Senhora de Lourdes, MG. A idade máxima do material utilizado foi de uma semana. Este material foi acondicionado em sacos plásticos perfurados – que permitiam um fluxo normal de ar – sendo pulverizados com água uma vez por dia na tentativa de manter as condições de umidade das folhas mais próximas possível das condições reais de recém colhidas.

Os experimentos em escala piloto foram realizados no sítio Nossa Senhora de Lourdes, onde a colheita foi feita entre 10h00min e 11h00min horas, horário, que segundo Coppen [1], permite o maior conteúdo de óleo nas folhas de eucalipto devido ao próprio metabolismo da planta.

Em escala laboratorial foram realizados os seguintes experimentos:

- Extração de óleo essencial por arraste de vapor;
- Determinação da densidade e empacotamento das folhas;
- Medição de espessura média das folhas;
- Medição da média de células produtoras de óleo por centímetro quadrado<sup>1</sup>;
- Composição do Óleo<sup>2</sup>.

Em escala piloto foram feitos os seguintes experimentos:

- Extração de óleo essencial por arraste de vapor;
- Medição da distribuição média de tamanhos das folhas retiradas da árvore;
- Medição da distribuição média de tamanhos das folhas picadas.

### 3.1 Extração de Óleo Essencial por Arraste de Vapor em Escala de Bancada

Foram preparadas amostras de folhas de eucalipto picadas e de combinações de folhas + galhos (picados) em uma proporção de 82,2:17,8% - proporção encontrada nas plantas.

As amostras foram pesadas em balança analítica Quimis® Digital modelo Q-500L210C até alcançarem o peso de  $52,5000 \pm 0,1000$ g. As amostras foram isoladas em recipientes vedados (Ziplock®) até o momento da extração – que nunca excedeu 8 horas da pesagem.

Para a extração utilizou-se um arranjo dos seguintes equipamentos:

- Balão de fundo redondo de 500 mL;
- Manta de aquecimento;

---

<sup>1</sup> Realizado no Laboratório de Graduação do Departamento de Eng. Bioquímica, utilizando microscópio óptico.

<sup>2</sup> Ensaio terceirizado.



- Dean Stack de 25 mL ;
- Condensador de bolas com cinco seções;
- Termômetro;
- Régua;
- Conjunto de mangueiras de silicone (para sistema de refluxo).

A Figura 3.1 apresenta a aparelhagem experimental utilizada no processo de extração conduzido à pressão atmosférica. No balão foram adicionados 250 mL de água destilada juntamente com a amostra. O sistema foi colocado na manta de aquecimento, e o processo de extração foi realizado com aferições periódicas do volume de óleo de 15 minutos de forma a se obter a curva cinética de extração. O processo de extração foi conduzido por 2 horas.



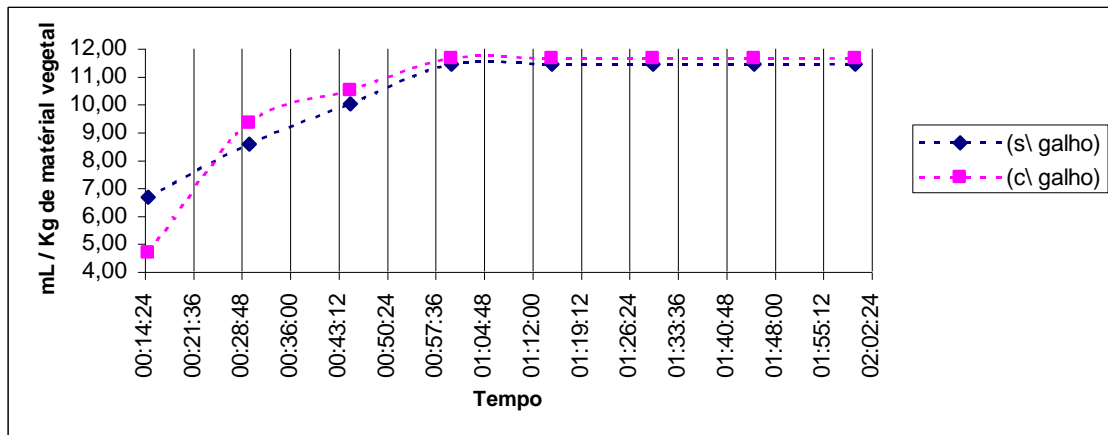
**Figura 3.1:** Aparato de extração em escala de bancada.

A Tabela 3.1 apresenta os dados experimentais obtidos em 6 experimentos para o processo de extração por arraste de vapor.

**Tabela 3.1:** Ensaios de extração de óleo essencial por arraste de vapor.

|                            | Ex-1        | Ex-2        | Ex-3        | Ex-4        | Ex-5        | Ex-6        |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Massa de Folhas (g)        | 52,5        | 42,7        | 52,5        | 43,2        | 52,5        | 52,5        |
| Massa de Galhos (g)        | 0           | 9,3         | 0           | 9,3         | 0           | 0           |
| <b>Massa Total (g)</b>     | <b>52,5</b> | <b>52,0</b> | <b>52,5</b> | <b>52,5</b> | <b>52,5</b> | <b>52,5</b> |
| Vol. H <sub>2</sub> O (mL) | 250,0       | 250,0       | 250         | 250,0       | 250,0       | 250,0       |
| 00:15:00                   | 0,20 mL     | 0,20 mL     | 0,40 mL     | 0,20 mL     | 0,60 mL     | 0,20 mL     |
| 00:30:00                   | 0,40 mL     | 0,40 mL     | 0,40 mL     | 0,40 mL     | 0,60 mL     | 0,40 mL     |
| 00:45:00                   | 0,60 mL     | 0,40 mL     | 0,50 mL     | 0,50 mL     | 0,60 mL     | 0,40 mL     |
| 01:00:00                   | 0,60 mL     | 0,40 mL     | 0,60 mL     | 0,60 mL     | 0,60 mL     | 0,60 mL     |
| 01:15:00                   | 0,60 mL     | 0,40 mL     | 0,60 mL     | 0,60 mL     | 0,60 mL     | 0,60 mL     |
| 01:30:00                   | 0,60 mL     | 0,40 mL     | 0,60 mL     | 0,60 mL     | 0,60 mL     | 0,60 mL     |
| 01:45:00                   | 0,60 mL     | 0,40 mL     | 0,60 mL     | 0,60 mL     | 0,60 mL     | 0,60 mL     |
| 02:00:00                   | 0,60 mL     | 0,40 mL     | 0,60 mL     | 0,60 mL     | 0,60 mL     | 0,60 mL     |

A Figura 3.2 mostra a curva cinética de extração do óleo essencial de *E. citriodora*. Segundo a literatura [1], o conteúdo em massa de óleo essencial no eucalipto varia entre 3 e 5%, sendo que no Brasil este conteúdo é da ordem de 5%, mas pode chegar a cerca de 8% em algumas regiões do País.



**Figura 3.2:** Curva cinética da composição média do óleo essencial de *E. citriodora*.

Baseado nestes resultados, foi possível determinar que a concentração máxima de óleo extraível com a pressão de admissão do vapor igual à pressão de saturação do vapor é de aproximadamente 12 mL/Kg de folhas, e que na escala de bancada, o tempo ideal de extração a 100°C e 1 atm é de 1 hora.

Foi possível também aferir a vazão de vapor condensado, que pode ser aproximada como sendo a vazão de vapor que atravessa o meio poroso composto pelas folhas de eucalipto. O valor encontrado foi de 5 mL/min e é a média dos valores de todas as destilações em escala de bancada.

### 3.2 Ensaio de Densidade da Folha de *Eucalyptus citriodora*

Para este ensaio, como a precisão não é fundamental, e sim uma análise qualitativa, uma vez que, por se tratar de material vegetal, estes valores irão variar de acordo com a localização geográfica, estação do ano, índice pluviométrico, etc, utilizou-se a abordagem de Archimedes para análise da densidade da folha.

Produziu-se 20 amostras de aproximadamente  $15 \pm 1$  g de folhas picadas. Cada amostra foi imersa em uma proveta e 250 mL de água destilada foi introduzida, de forma que as amostras ficassem todas submersas e com o menor contato possível com as paredes. O volume de água deslocado foi aferido e a densidade calculada indiretamente pela relação 3.1:

$$\varphi = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad (3.1)$$

Uma densidade média de 0,4703 g/cm<sup>3</sup>, com desvio padrão de 0,0721 foi obtida a partir de 20 amostras.

### 3.3 Ensaio de Empacotamento

Para este ensaio, novamente a precisão não era fundamental, então foi utilizado um método de proveta para calcular o volume dos espaços vazios, baseado no valor obtido no ensaio de densidade das folhas.

20 amostras de  $65 \pm 1$  g de folhas picadas foram produzidas e colocadas uma a uma em proveta graduada de 2 L. Com base no volume aferido e na densidade estimada das folhas de eucalipto, pode-se determinar qualitativamente a porosidade pela equação 3.2.

$$\phi = \frac{\text{volume}_{\text{aferido}} - \frac{\text{massa}_{\text{folhas}}}{\rho}}{\text{volume}_{\text{aferido}}} \quad (3.2)$$

Com base nos valores calculados pela equação 3.2, foi obtido um valor médio de porosidade de 0,2475.

### 3.4 Medição da Espessura Média das Folhas

Duas metodologias foram usadas neste ensaio, a primeira análoga ao ensaio de densidade, onde a área superficial da amostra era conhecida ( $1\text{cm}^2$ ), assim como a densidade da amostra, e a partir do volume de água deslocado, pôde-se medir a espessura das folhas.

A segunda metodologia foi o uso de um paquímetro digital. Esta medida direta foi utilizada para validar a metodologia anterior. Vinte amostras foram analisadas para cada método.

Foi obtida com o processo com proveta, uma espessura média de  $4,39 * 10^{-4}$  m e com o paquímetro  $4,35 * 10^{-4}$  m de espessura, respectivamente.

### 3.5 Medição da Quantidade Média de Células Produtoras de Óleo por Centímetro Quadrado

Para esta medida utilizou-se o microscópio óptico Olympus com ampliação de 20 X e 20 amostras de  $0,5 \times 0,5$  cm de folhas. As medidas se baseiam na contagem do número de células produtoras de óleo, que são pontos escuros presentes na superfície da folha, muito bem identificáveis quando se aciona a luz do equipamento.

O resultado obtido foi uma média de 1356 células produtoras de óleo por  $\text{cm}^2$ , o que pode ser ratificado pelos valores encontrados na literatura [1] e [6].

### 3.6 Ensaio de Composição do Óleo

Este ensaio foi efetuado no Laboratório de Compostos Fitoterápicos da Fiocruz, onde foi utilizada uma metodologia cromatográfica própria. A Tabela 3.2 apresenta os principais componentes presentes no óleo de eucalipto.

**Tabela 3.2:** Composição média do óleo essencial de eucalipto.

| Substância                | Composição (%) |
|---------------------------|----------------|
| Isopulegol                | 7,49           |
| 2,6-dimetil-2,6-octadieno | 2,90           |
| Geraniol                  | 14,40          |
| Citronelal                | 75,21          |

### 3.7 Extração de Óleo Essencial de Eucalipto por Arraste de Vapor em Escala Piloto

Um dos grandes diferenciais deste projeto foi a construção de uma planta em escala piloto para a produção do óleo essencial de eucalipto, o que permitiu ter contato com as dificuldades do processamento do material em uma maior escala, mesmo ainda estando bem distante das toneladas de matéria-prima da escala industrial. O manuseio de quantidades de até 10 kg de folhas pode fornecer uma idéia preliminar de toda a logística envolvida no processo, algo muito além da “simples” modelagem de uma planta. Desta forma, a operação em escala piloto foi bastante desafiadora.

#### 3.7.1 Projeto da Planta Piloto

A planta piloto (Figura 3.3) foi um *scale-up* da escala de bancada com custo reduzido, utilizando material que pode ser encontrado no comércio local a preços acessíveis e de fácil construção. O único desafio entre custo e benefício neste *scale-up* foi o condensador. A fim de superar o desafio, dentro de um orçamento mínimo, utilizou-se um condensador laboratorial de bolas de sete seções – gentilmente cedido pelo laboratório de graduação do Departamento de Processos Orgânicos, no período de férias.



**Figura 3.3:** Equipamento de extração operante.

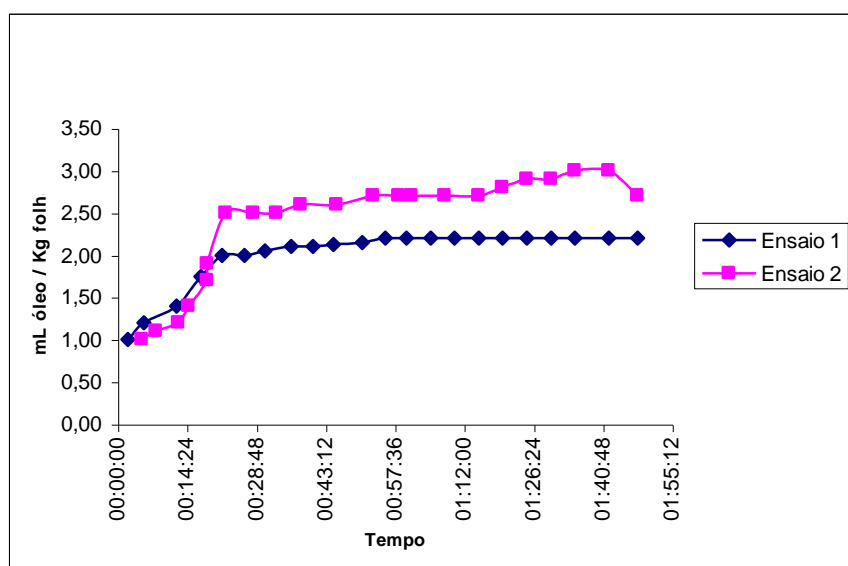
Para a construção, utilizou-se aparato de fabricação própria e alguns instrumentos de laboratório, por permitirem uma melhor observação do fenômeno.

- Fogão de *Camping* de uma boca e 6 queimadores;
- Panela Industrial de 30 L adaptada;
- “Rabicho” de conexão para água quente em instalações hidráulicas;

- Tubos e Conexões de PVC Tigre Aqua-Therm® (CPVC);
- Dean Stack;
- Condensador de bolas;
- Mangueiras de silicone - para o sistema de refluxo;
- Selo de segurança;
- Câmara de ar de trator – para vedação;
- Vergalhão de Aço – utilizado como fecho do refervedor.

No aparato da Figura 3.3, introduziu-se 1,0 kg de folhas em 7 litros de água. As folhas foram picadas manualmente de forma a se equiparar com o tamanho médio das folhas picadas por um picador de folha automático ou moinho de facas. O tempo de extração foi de 2 horas, com medidas feitas a cada 5 minutos para a construção da curva cinética (Figura 3.4).

Pode-se verificar que com o aumento da escala, o efeito da porosidade passa a ser determinante, visto que o conteúdo de óleo extraído por massa de folhas foi quase quatro vezes menor que o da escala de bancada.



**Figura 3.4:** Curva cinética de extração de óleo essencial de eucalipto em escala piloto.

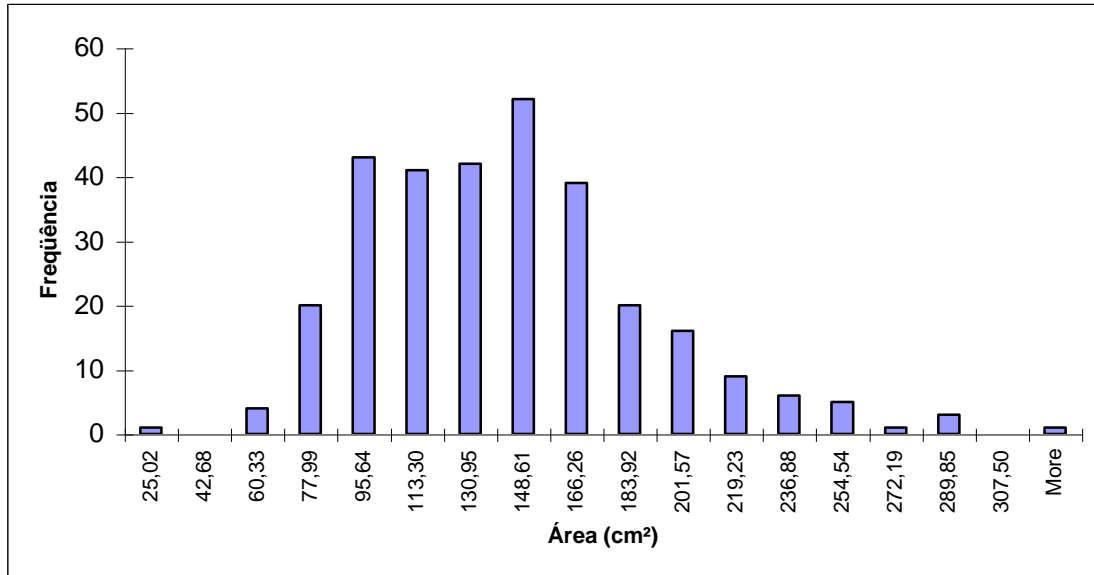
### 3.8 Medição da Distribuição Média de Tamanhos das Folhas Retiradas da Árvore

Neste ensaio, objetivou-se a medição das folhas retiradas diretamente da árvore, a fim de encontrar a sua distribuição de tamanho.

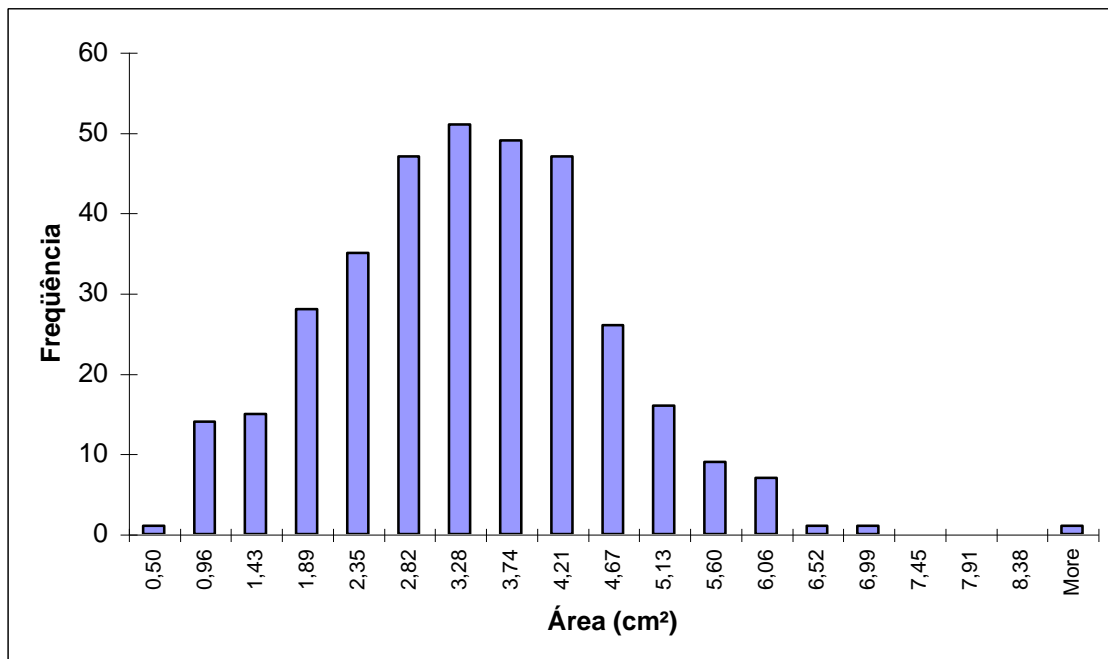
Para execução do ensaio, foi utilizado um paquímetro e estabelecida uma geometria de elipse para as folhas, os eixos principais foram tomados como o maior comprimento possível na direção longitudinal (paralela ao caule da folha) e axial (perpendicular ao caule da folha).

No caso das folhas picadas, foi utilizada a mesma abordagem, mas desta vez aproximou-se as folhas por um retângulo.

As Figuras 3.5 e 3.6 apresentam a distribuição de tamanhos das folhas inteiras e picadas, respectivamente.



**Figura 3.5:** Distribuição de tamanho das folhas inteiras.



**Figura 3.6:** Distribuição de tamanho das folhas picadas.

Pode-se verificar que as folhas picadas possuem uma distribuição mais homogênea de tamanhos, o que em um processo que depende do empacotamento, gera resultados muito melhores, pois diminui os caminhos preferenciais.

Com base nos dados experimentais, pode-se observar que a definição de condições ótimas de operação é fundamental para extrair o máximo de produto pelo menor custo. Para tal, nos capítulos subsequentes estudar-se-á um modelo de extração do óleo essencial por arraste de vapor em um meio poroso.

# Capítulo 4: Modelo para Estudo da Extração de Óleo Essencial

## 4.1 Introdução

Nos processos que ocorrem em meios porosos, um dos maiores gargalos encontra-se no cálculo de propriedades termodinâmicas “pontuais” e dados de fenômenos de transporte, pois dentro deste sistema, as propriedades variam enormemente demandando uma grande capacidade computacional para resolver um conjunto numeroso de equações, muitas vezes não lineares.

Na literatura, muitos estudos são apresentados a respeito do uso da abordagem do contínuo com ferramentas como diferenças finitas, elementos finitos e outras, utilizados para representar o sistema. Entretanto, estes modelos além de pouco precisos, na maioria das vezes são muito locais, permitindo apenas o seu uso na situação específica modelada, não possibilitando uma extrapolação de escala segura ou avaliação de outros parâmetros de processo. [7] ao [13]

Uma outra abordagem para o estudo de meios porosos é a estocástica. Contudo, tais estudos estão, em sua maioria, ligados à tecnologia do petróleo e de catalisadores, não tendo sido encontrado na literatura nenhum uso deste tipo de ferramenta na tecnologia de óleos essenciais. [14] ao [19]

A abordagem estocástica de processos em meios porosos pode ser explicado majoritariamente pelo fenômeno estatístico da percolação e pela geometria fractal, muito bem explicado no trabalho de Aharony et al. [20]

## 4.2 Desenvolvimento Teórico do Modelo

### 4.2.1 Modelo de Rede

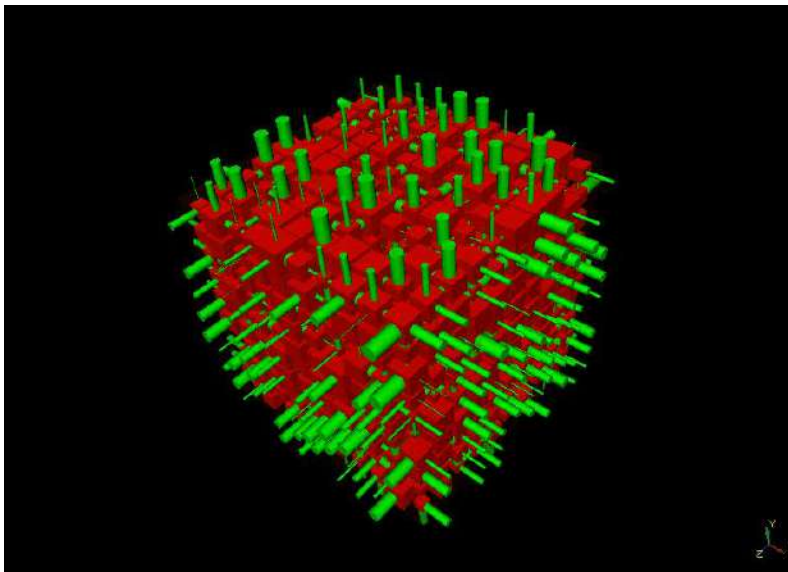
Diversos elementos devem ser levados em conta quando se estuda um meio poroso por ferramentas estatísticas, mas as principais são: o modelo de rede utilizado, as propriedades físico-químicas e de transporte, e o modelo termodinâmico. Para agregar todos estes fenômenos, modelos e propriedades, existem primordialmente três abordagens: a teoria da percolação [20], redes dinâmicas complexas [21] e redes complexas correlacionadas [22].

Das três abordagens existentes, pode-se destacar aquela conhecida como modelo de rede de Matthews [22], devido à sua flexibilidade em representar uma vasta gama de meios porosos (ex. tecidos em processos de tinturaria, Arenito de Clashac em processos de poços de petróleo, etc). Infelizmente, este modelo sozinho não pode representar um processo químico, pois em sua natureza ele simplesmente representa a parte estrutural do meio poroso, portanto um modelo de transporte e um modelo termodinâmico também devem.

A rede de Matthews é composta basicamente de *Lattices* (cubos) e *Bounds* (gargantas), que seguem uma distribuição completamente randômica. Posteriormente, o trabalho de Monteagudo et al. [17] e de Moreira [23] tornaram esta rede menos aleatória inserindo diferentes distribuições estatísticas para os *Lattices* e os *Bounds*, assim como o fator  $\Omega$  de correlação entre estas distribuições, que pode variar entre 0 e 1.

Neste trabalho, utilizou-se a rede de Matthews modificada para simular o fenômeno de extração em um elemento cúbico que representa cerca de 1cm<sup>3</sup> do reator real. Em seguida, este valor foi extrapolado para todo o reator. Tal procedimento apresentou resultados condizentes com os dados experimentais (Figura 4.1).

Para construir a rede, o primeiro passo foi seguir o algoritmo aplicado por Moreira (13), isto é, construir a rede com base nos quatro parâmetros (distribuições de *Lattices*, de *Bounds*,  $\Omega$  e conectividade). Após a construção da rede, utilizou-se um algoritmo genético híbrido proposto por Peçanha et al. [38] para garantir que a porosidade da mesma fosse igual à determinada pelo processo (valor obtido no teste de empacotamento). O processo que ajusta a porosidade consiste no uso de um algoritmo de otimização (genético) que troca *Lattices* e *Bounds* de lugar dentro da rede até que o valor demandado de porosidade seja alcançado. Neste trabalho, permitiu-se uma tolerância de 2% do valor real.



**Figura 4.1:** Rede de Matthews Modificada já ajustada para a porosidade igual a 0,2475

Com a rede construída, define-se um gradiente de pressão no elemento, que representa o gradiente de pressão que existirá entre as faces do elemento.

Para representar o fenômeno de fluxo de vapor pelos interstícios da rede, utilizou-se a equação de Poiseuille (Equação 4.1) para capilares:

$$\Delta P = \frac{128\mu L Q}{\pi d^4} \quad (4.1)$$

Onde  $P$  é a pressão,  $\mu$  a viscosidade do fluido,  $L$  o comprimento da garganta,  $Q$  o fluxo de fluido e  $d$  o diâmetro da garganta.

Aproximando as gargantas por capilares, a Equação 4.1 pode ser usada para calcular a pressão em cada um dos *Lattices* da rede por meio da Equação 4.2.

$$nP - \sum_{i=0}^n P_i = \sum K \left( \frac{128\mu L_i}{\pi d_i^4} \right) \quad (4.2)$$



Onde  $P$  é a pressão na conectividade do *Lattice* e  $K$  é uma constante de proporcionalidade que engloba também o fluxo.

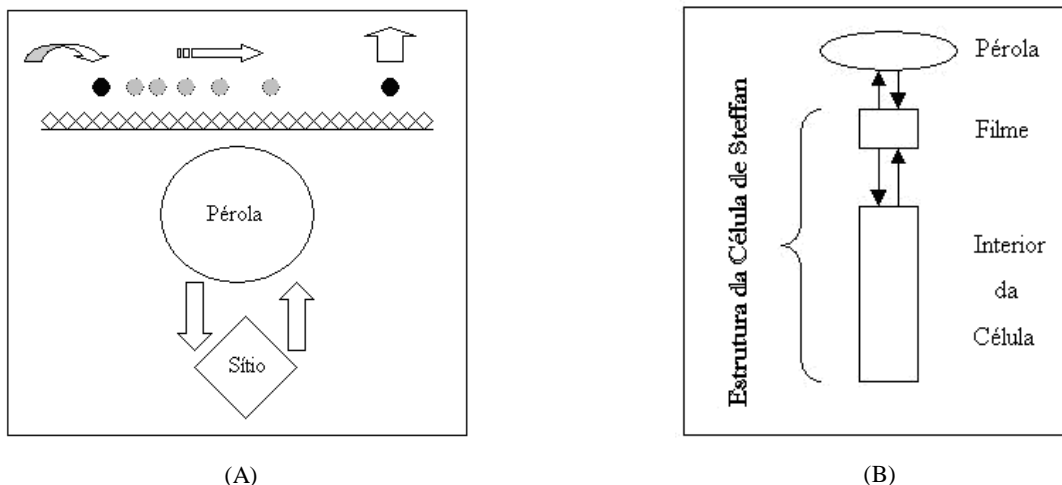
Quando se resolve este conjunto de equações, deve-se levar em conta que a rede apresenta uma estrutura de *clusters*, o que levará a uma matriz singular ao tentar-se resolver diretamente o sistema. Portanto, a separação dos clusters pelo algoritmo de Hoshen-Koppelman [24] é necessária, dividindo o sistema em subsistemas de solução possível. Outra abordagem possível seria a expansão da matriz do sistema em séries, que se mostra inviável porque o erro acumulado seria muito maior que os valores resultantes do sistema, o que inviabiliza o uso da expansão em séries.

Após a resolução do sistema, tem-se um perfil de pressão ao longo da rede, o que permite o uso de um passeador aleatório, que entrará na rede por uma das gargantas localizadas na fronteira e seguirá o caminho por dentro da mesma até sair em outra fronteira. No caso deste trabalho, as únicas fronteiras de entrada e saída são a inferior e a superior. Para escolher o caminho a seguir, o passeador aleatório gera um valor pseudo-aleatório viciado em função do diâmetro e a pressão da garganta a seguir, ou seja, quanto maior o diâmetro, menor a chance de seguir por aquele caminho (Lei de Poiseuille – Eq. 4.1).

Com este procedimento, pode-se calcular a distribuição de tamanho de caminhos percorridos por uma pérola de vapor que entra na rede.

#### 4.2.2 Abordagem da Pérola de Vapor

Nesta abordagem, uma pequena massa de vapor entra em uma das gargantas em um instante de tempo muito pequeno, podendo ser considerada como um elemento finito de forma esférica de diâmetro igual ao diâmetro da garganta. Esta aproximação é considerada conveniente, pois o diâmetro desta pérola é da mesma ordem de grandeza das células produtoras de óleo, o que permitirá aproximar as células produtoras de óleo por células de Steffan, dispostas em uma linha reta infinita. Desta forma, pode-se modelar o fenômeno de transferência de massa que ocorre quando o vapor passa pela superfície da folha e “arrasta” o óleo essencial.



**Figura 4.2:** Abordagem para a transferência de massa. (A) Detalhe da abordagem da pérola. (B) Aproximação da célula de produção de óleo por uma célula de Steffan e uma resistência de filme. **Fonte:** Autoria própria.

Pela abordagem da pérola, podemos definir, além da quantidade de óleo extraído (contabilizando o total de óleo acumulado após a extração), a quantidade de óleo que

permaneceu no meio poroso e onde no meio poroso (sendo que estas duas últimas partes fogem ao escopo deste trabalho).

### *4.2.3 A Transferência de Massa*

Para simular a transferência de massa entre a pérola e o cerne da célula produtora de óleo, utilizou-se a abordagem por Stefan-Maxwell multicomponente para a transferência entre o filme líquido formado na superfície da folha e a segunda lei de Fick para a transferência entre a célula produtora de óleo e o filme líquido na superfície da folha (ver Figura 4.2 (A)).

Estas abordagens podem ser encontradas nas referências [25] a [27] e não serão discutidas neste trabalho, pois o tornariam demasiadamente extenso. A metodologia de solução das equações geradas pelos modelos são as soluções simplificadas implementadas por Krishna et al. [27] para o modelo de Steffan-Maxwell e a abordagem das diferenças finitas [28] para o modelo de Fick.

### *4.2.4 Cálculo de Propriedades*

Muitas vezes, no modelo de transferência de massa, foi necessário o cálculo da concentração de determinado componente em alguma fase de interesse do processo. Para tal, utilizou-se a equação de estado (EoS) de Peng e Robinson com regra de mistura clássica (de Van der Waals), sendo que os valores dos parâmetros de interação binária  $K_{ij}$  foram estimados de acordo com a literatura. [29] e [30]

Com o decorrer dos ensaios, notou-se também que a utilização de um modelo de energia livre de Gibbs em excesso se faz necessário para o cálculo do desvio da idealidade na transferência de massa. O modelo escolhido foi o UNIFAC proposto por Gmehling et al. [31]. Este modelo foi escolhido devido aos bons resultados, mas também devido ao fato de ser o único que comporta os componentes do óleo essencial. Os outros modelos da literatura como NRTL e Wilson, por exemplo, não possuem parâmetros para tais compostos documentados. Sabe-se também que o uso do modelo UNIFAC apresentará um seriíssimo problema, pois dos quatro compostos principais do óleo essencial, três são isômeros, o que certamente gerará propriedades iguais sob o ponto de vista do modelo. Infelizmente, a literatura não dispõe de ferramenta mais precisa, e o desenvolvimento de uma nova foge ao escopo deste trabalho.

## **4.3 Materiais e Métodos**

De posse do software produzido de acordo com a teoria descrita no tópico 4.2, procedeu-se à obtenção dos dados necessários para execução do programa e verificação da conformidade dos mesmos por simulação com os dados obtidos experimentalmente.

### 4.3.1 Propriedades Críticas

Para a utilização de modelos termodinâmicos, seja para o uso com equações de estado e/ou o uso com modelos de GE (Energia Livre de Gibbs em Excesso), o primeiro passo é a determinação das propriedades críticas dos compostos em estudo.

Os compostos presentes em óleos essenciais, infelizmente, ainda não foram devidamente documentados sob o ponto de vista termodinâmico, sendo que, na maioria das vezes, o único dado disponível é a densidade, massa molar e temperatura de ebulição (além de informações toxicológicas). Neste cenário, a busca pelas propriedades críticas dos compostos em questão na literatura foi infrutífera, o que levou à necessidade de utilizar um modelo de estimação de parâmetros críticos.

O modelo mais utilizado para este fim é o de Joback, que utiliza contribuições de grupos. Contudo, este modelo, assim como o modelo UNIFAC, não consegue diferenciar os compostos isômeros. Utilizou-se, por isso, o modelo de Gani, que permitiu estimar a pressão, temperatura e volume crítico, além do fator acêntrico (Tabela 4.1) em compostos isômeros. [32] e [33]

**Tabela 4.1:** Propriedades críticas estimadas.

| Composto                  | T <sub>c</sub> (K) | P <sub>c</sub> (bar) | V <sub>c</sub> (cm <sup>3</sup> ) | ω      |
|---------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------|--------|
| Isopulegol                | 705,2993           | 27,1381              | 516,4900                          | 0,6914 |
| 2,6-dimetil-2,6-octadieno | 635,9245           | 21,8108              | 1545,9300                         | 0,1923 |
| Geraniol                  | 693,4747           | 22,7811              | 595,5300                          | 0,5732 |
| Citronelal                | 671,4295           | 22,8662              | 574,4500                          | 0,3270 |
| Água (*)                  | 647,0000           | 220,6000             | -                                 | 0,3443 |

(\*) valores retirados do NIST Webbook [34].

Com a mesma ferramenta de contribuição de grupos de Gani, foi possível estimar as seguintes propriedades: temperatura de fusão, temperatura de ebulição e volume molar dos compostos (Tabela 4.2).

**Tabela 4.2:** Propriedades físico-químicas dos componentes do óleo<sup>3</sup> e da água.

| Composto                  | T <sub>fusão</sub> (K) | T <sub>ebulição</sub> (K) | V <sub>líquido</sub> (cm <sup>3</sup> /mol) | Massa Molar |
|---------------------------|------------------------|---------------------------|---|-------------|
| Isopulegol                | 298,7844               | 501,8346                  | 211,2400                                    | 154,2493    |
| 2,6-dimetil-2,6-octadieno | 240,8317               | 452,4660                  | 177,9300                                    | 138,2499    |
| Geraniol                  | 285,7868               | 509,5888                  | 199,4500                                    | 154,2493    |
| Citronelal                | 252,7394               | 483,0711                  | 183,1100                                    | 154,2493    |
| Água                      | 273,0000               | 373,1000                  | 18,0000                                     | 18,0000     |

Com base nas poucas informações presentes na literatura, foi possível também aferir uma ordem de grandeza para os erros da estimação dos componentes do óleo (Tabela 4.3).

<sup>3</sup> A massa molar foi obtida tanto no NIST, quanto na Wikipédia, e conferido manualmente com o uso da Tabela Periódica.

**Tabela 4.3:** Erros estimados do procedimento.

| <b>Composto</b>           | <b>Desvio</b> | <b>Propriedade Utilizada</b> | <b>Referência</b> |
|---------------------------|---------------|------------------------------|-------------------|
| Isopulegol                | 3,44%         | V <sub>líquido</sub>         | [35]              |
| 2,6-dimetil-2,6-octadieno | 3,08%         | V <sub>líquido</sub>         | [34]              |
| Geraniol                  | 1,27%         | V <sub>líquido</sub>         | [34]              |
| Citronelal                | 0,43%         | V <sub>líquido</sub>         | Wikipédia         |

De posse dos dados críticos e das principais propriedades físico-químicas, pode-se proceder à simulação.

#### 4.3.2 Pressão de Saturação

Os dados de pressão de saturação para os compostos dos óleos não estão presentes na literatura, o que acarretou na estimativa dos seus valores com base em modelos já existentes. O problema com a estimação de pressão de saturação é que não existem modelos de contribuição de grupos satisfatórios, e a utilização de fugacidades como é proposto em [36] demandaria bastante tempo. Utilizou-se, portanto o modelo proposto por Mansoori et al. [37], onde os parâmetros da equação de Wilson são estimados por meio de correlações empíricas em função do fator acêntrico. Novamente, utilizando o algoritmo genético proposto em [38], adequou-se os dados gerados pela equação de Wilson à Equação de Antoine, gerando os valores da constante de Antoine, que são muito mais fáceis de serem tratados e trabalhados, o erro inserido no processo foi desprezível – da ordem de 0,046% no pior caso (Tabela 4.4).

**Tabela 4.4:** Constantes da Equação de Antoine.

| <b>Composto</b>           | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>C</b> |
|---------------------------|----------|----------|----------|
| Isopulegol                | -0,000   | 391,000  | -217,000 |
| 2,6-dimetil-2,6-octadieno | -0,064   | 174,000  | -198,000 |
| Geraniol                  | -0,000   | 99,600   | -251,000 |
| Citronelal                | -0,000   | 187,000  | -236,000 |
| Água                      | 3,560    | 643,748  | -198,043 |

#### 4.3.3 Coeficientes de Difusão

O coeficiente de difusão pode ser tratado como um elemento estático, o que gera desvios muito altos no que diz respeito à verossimilhança dos dados, sendo esta uma aproximação utilizada somente em misturas binárias muito diluídas.

No sistema em estudo, os compostos não podem ser considerados muito diluídos, tão pouco a mistura é binária, o que leva à necessidade de um modelo adequado para determinação do coeficiente de difusão. Este coeficiente foi diretamente utilizado no modelo de filme para a transferência de massa em nosso sistema, sendo válido mesmo após a determinação de um pseudo-composto.

Para tal utilizou-se a correlação de Wilke e Lee [39] para estimação dinâmica do coeficiente de difusão da fase vapor e a correlação de Hayduk e Minhas [39] para o coeficiente

de difusão da fase líquida. O efeito das altas concentrações na fase líquida do sistema foi corrigido pela correlação de Vignes [27].

Infelizmente, estes modelos precisam da estimativa de algumas outras propriedades dos compostos em questão. Para tal, foram utilizadas as seguintes correlações e modelos:

Tensão Superficial: Correlação dos estados correspondentes [39];

Viscosidade: Método de Przedzick e Sridhar [39];

Viscosidade dependente da pressão: Correlação de Lucas [39].

Segundo Krishna et al. [27], todos estes modelos apresentam desvios da ordem de 5%, quando utilizados em sistemas não alcoólicos. No entanto, neste trabalho espera-se que tais desvios sejam um pouco mais acentuados devido à natureza complexa dos componentes.

#### *4.3.4 Ensaio Computacional de Extração de Óleo Essencial de Eucalipto*

##### 4.3.4.1 Ensaio de Bancada

Para proceder a este ensaio foram utilizados os dados experimentais obtidos no capítulo 3, além da base teórica e dos dados estimados neste capítulo.

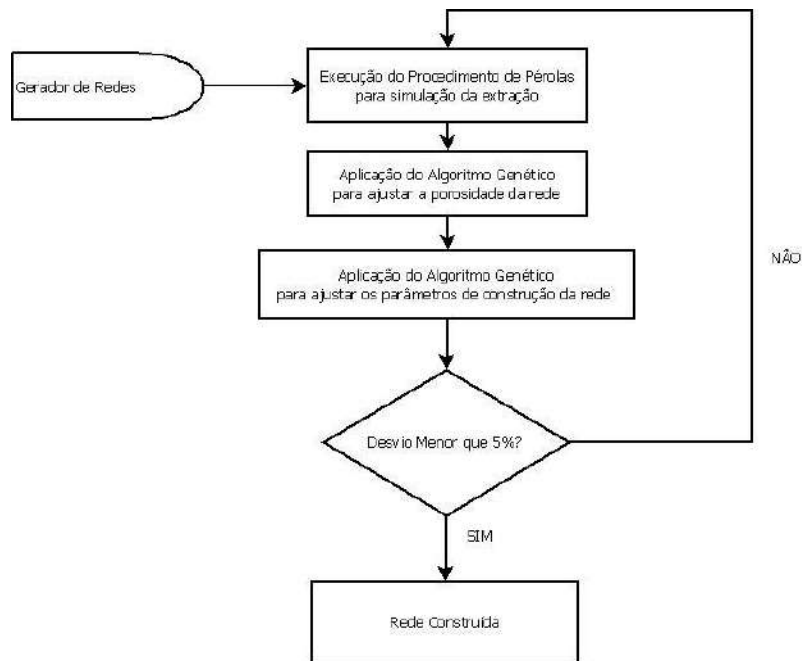
A estratégia utilizada foi:

1) Cálculo da distribuição de óleo no sistema de pérolas:

Procedeu-se a um balanço de massa onde por meio da densidade, superfície média, espessura média, densidade superficial de células produtoras de óleo e produção total de óleo, a quantidade média de óleo por célula produtora foi calculada como sendo  $3,107 \cdot 10^{-7}$  g. Neste procedimento, assumiu-se que toda célula possui a mesma concentração de óleo, baseado no fato de que o óleo é na verdade um sistema de proteção contra predadores, portanto deve possuir uma composição bastante uniforme na mesma planta. Assumiu-se também que a composição do óleo dentro das células produtoras é a mesma do óleo extraído.

2) Utilização do algoritmo genético proposto por Pessoa et al. [38] para, com base nos valores da curva cinética de extração em escala de bancada, estimar os valores da conectividade, diâmetros de poros e o fator  $\Omega$ . Dentro do mesmo procedimento, a porosidade calculada experimentalmente foi introduzida na rede em questão. Vale notar que para este procedimento, a composição do óleo não foi utilizada, e sim um pseudo-componente que possui todas as suas propriedades baseadas na média ponderada de cada componente do óleo. Utilizou-se tal simplificação para reduzir o tempo de execução do procedimento.

A Figura 4.3 mostra o algoritmo utilizado.



**Figura 4.3:** Algoritmo para construção da rede. **Fonte:** Autoria própria.

Com a construção da rede finalizada, foram verificados os resultados mostrados na Tabela 4.5:

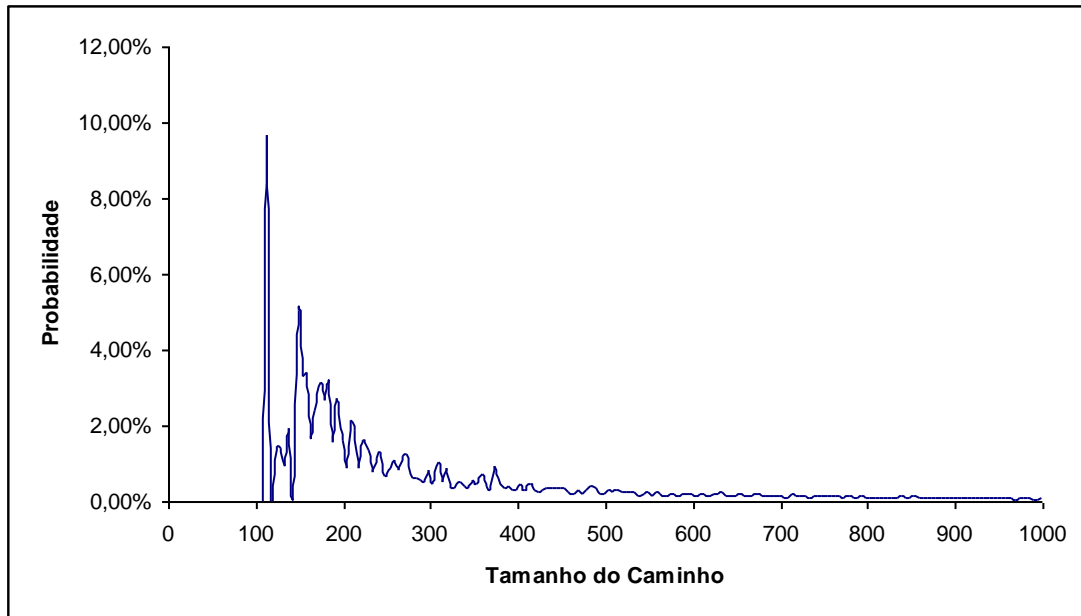
**Tabela 4.5:** Ajuste dos parâmetros da rede.

| Ensaio | Conectividade | Diâmetros [Min - Max] | Fator $\Omega$ | Porosidade |
|--------|---------------|-----------------------|----------------|------------|
| 1      | 3,5           | [01 - 250]            | 0,50           | 0,21       |
| 2      | 3,9           | [02 - 109]            | 0,55           | 0,22       |
| 3      | 4,0           | [10 - 150]            | 0,64           | 0,21       |
| 4      | 3,1           | [01 - 103]            | 0,25           | 0,25       |
| 5      | 3,8           | [03 - 078]            | 0,38           | 0,23       |
| 6      | 3,4           | [15 - 130]            | 0,44           | 0,26       |
| 7      | 3,1           | [09 - 201]            | 0,36           | 0,28       |
| 8      | 4,2           | [26 - 340]            | 0,26           | 0,23       |
| 9      | 3,2           | [05 - 105]            | 0,44           | 0,22       |
| 10     | 3,8           | [01 - 100]            | 0,30           | 0,26       |
| MÉDIA  | 3,6           | [07 - 157]            | 0,41           | 0,24       |

Considerou-se que a melhor rede é aquela que apresentar a menor soma dos erros relativos de cada parâmetro (erro entre o valor encontrado e o médio). Desta forma, foi verificado que a melhor rede é a do ensaio 9, que foi utilizada em todos os ensaios daqui por diante.

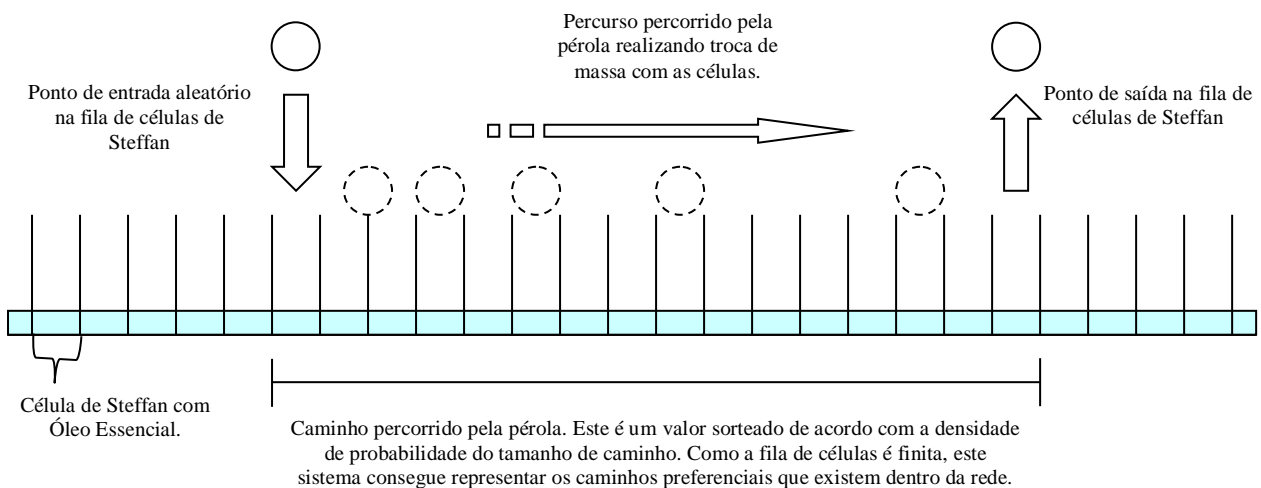
3) Com a rede construída, deu-se início ao procedimento de medição da distribuição de caminhos dentro da rede complexa utilizada. Para tal, utilizou-se a abordagem dos passeadores aleatórios sucintamente explicada anteriormente e explicada em detalhes em [20] e [23]. A pressão no condensador do sistema foi considerada igual a ambiente e no fundo do vaporizador igual a 1,1 atm.

Com este procedimento, a distribuição de tamanhos médios foi encontrada (Figura 4.4). Deve-se notar que a unidade deste caminho ainda não foi determinada, pois a construção da rede não depende deste valor por causa do princípio fractal, explicado em [20] e [23] e abordado mais adiante neste trabalho.



**Figura 4.4:** Densidade de probabilidade de tamanho de caminhos dentro da rede.

4) Com os dados da densidade de probabilidade do tamanho de caminhos dentro da rede, pode-se proceder ao ensaio computacional de extração pelo método das pérolas, que está detalhadamente explicada nas Figuras 4.5 e 4.6.



**Figura 4.5:** Esquema simplificado da abordagem da pérola. **Fonte:** Autoria própria.

A composição inicial de cada pérola foi de 100% de vapor de água.

O tempo de troca de massa foi estimado em cerca de 0,6s pelo algoritmo de otimização Simplex [40] cuja função objetivo foi o erro relativo (Equação 4.3) entre o valor estimado de óleo extraído e o primeiro ponto da curva da cinética de extração do ensaio em laboratório.

$$FOB = \left| \frac{OE^{exp.} - OE^{calc}}{OE^{exp}} \right| \quad (4.3)$$

O tempo de simulação do ensaio computacional foi definido como sendo igual ao tempo do ensaio experimental.

A vazão volumétrica de vapor que entra em uma rede específica é definida pela Equação 4.4.

$$Q = \frac{(V_{condensado} / A_{recipiente})}{NPS * Conectividade} * A_{rede}^S \quad (4.4)$$

Nesta equação  $Q$  é a vazão volumétrica de vapor que entra na rede,  $V_{condensado}$  o volume de condensado por unidade de tempo,  $A_{recipiente}$  a área da seção reta do vaporizador,  $NPS$  o número de poros por lado da rede utilizada (neste trabalho 10) e  $A_{rede}^S$  a área de uma das faces da rede.

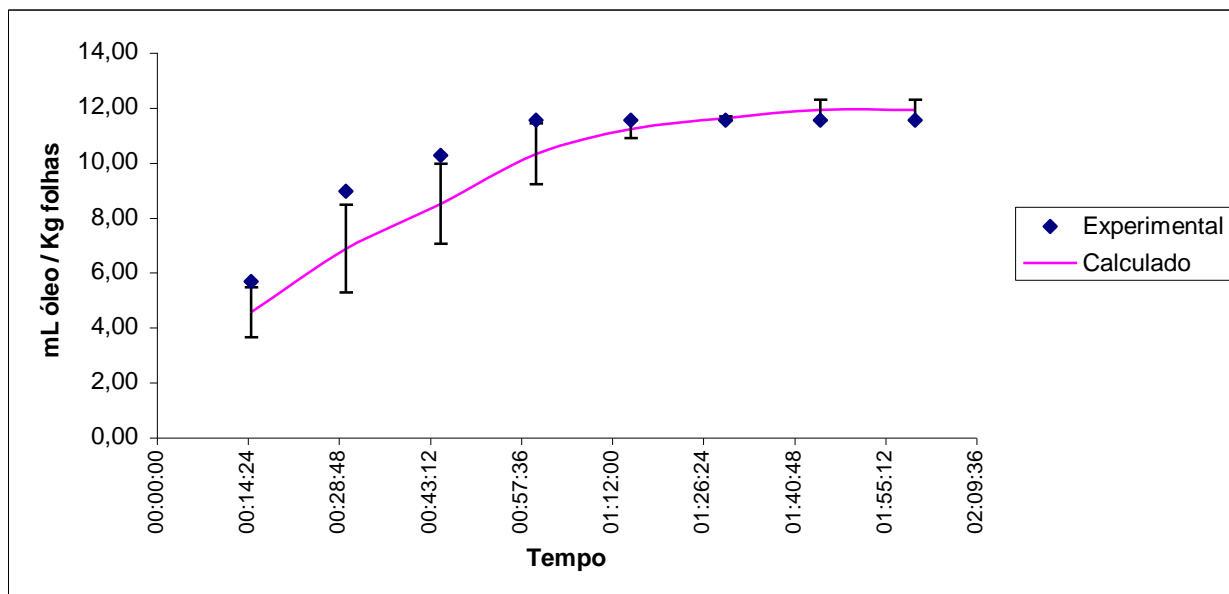
Para quantificar o número de pérolas por segundo, foi definido que o diâmetro da pérola é igual ao menor diâmetro de garganta na rede, neste caso 0.5 unidades de comprimento, sendo que este também é o diâmetro considerado para as células de Steffan. O número de pérolas é dado pela divisão de  $Q$  (Equação 4.4) pelo volume da pérola.





**Figura 4.6:** Procedimento da pérola simplificado. **Fonte:** Autoria própria.

A simulação do procedimento de extração pela abordagem da pérola de vapor, gerou os seguintes resultados. Como valor de referência experimental, foi utilizada a média dos valores das extrações com e sem galhos (Figura 4.7).



**Figura 4.7:** Resultados da simulação em escala de bancada.

Pode-se ver, claramente, que os valores simulados pela abordagem da pérola em redes complexas conseguem representar o fenômeno de extração por arraste de vapor do óleo essencial de eucalipto. O desvio entre os dados simulados e os dados experimentais foi da ordem de 10%, mas vale ressaltar que o comportamento assintótico apresentou desvio menor do que 3%. Com isso, foi considerado daqui por diante que o modelo é válido para representar o sistema.

Agora há a necessidade de validar a idéia fractal desta abordagem, a fim de mostrar que a mesma rede que representou o sistema em escala de bancada pode representar um sistema maior, antes, porém, é conveniente comentar a idéia fractal e a correspondência dos gradientes de pressão.

#### 4.3.4.2 A idéia Fractal e a Correspondência dos Gradientes de Pressão

##### *A Idéia Fractal*

Um fractal (anteriormente conhecido como curva monstro) é um objeto geométrico que pode ser dividido em partes, sendo cada parte semelhante ao objeto original. Diz-se que os fractais têm infinitos detalhes, são geralmente auto-similares e independem de escala. Em muitos casos um fractal pode ser gerado por um padrão repetido, tipicamente um processo recorrente ou iterativo.

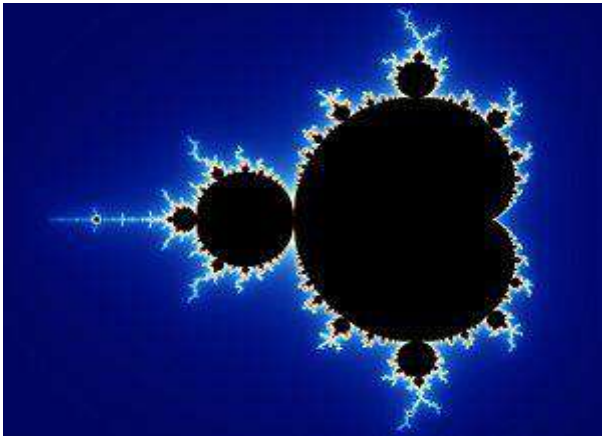
O termo foi criado em 1975 por Benoît Mandelbrot, matemático francês, nascido na Polônia, que descobriu a geometria fractal na década de 70 do século XX, a partir do adjetivo latino fractus, do verbo frangere, que significa quebrar (Figura 4.8).

A geometria fractal é o ramo da matemática que estuda as propriedades e comportamento dos fractais. Descreve muitas situações que não podem ser explicadas facilmente pela geometria clássica, e foram aplicadas em ciência, tecnologia e arte gerada por computador. As raízes conceituais dos fractais remontam à tentativa de medir o tamanho de objetos para os quais as definições tradicionais baseadas na geometria euclidiana falham.

Vários tipos de fractais foram originalmente estudados como objetos matemáticos (Figura 4.9) [Wikipédia].

Em seu trabalho, Moreira [23] demonstrou que um sistema poroso representado por uma rede complexa pode ser considerado como um fractal a partir de um tamanho (NPS) definido. Neste mesmo trabalho, ele provou que um valor de NPS igual a 3 já é suficiente para gerar auto-similaridade em um sistema formado por  $n$  redes de Matthews, este valor aumenta a medida que o tamanho dos poros aumenta, sendo que para uma rede de Matthews de volume equivalente a  $1 \text{ m}^3$ , o valor de NPS que gera auto-similaridade está em torno de 6. Portanto, neste trabalho, utilizou-se um NPS igual a 10, devido a poucos dados concretos a respeito da estrutura interna da matriz porosa do sistema. O volume de cada rede de Matthews utilizada em todos os sistemas modelados foi definido como sendo  $1 \text{ cm}^3$ .

O modelo fractal foi escolhido neste trabalho por representar muitos sistemas complexos existentes, tanto na natureza, quanto na ciência e tecnologia criadas pelo ser humano. Vários exemplos da aplicação científica dos fractais podem ser encontrados em [20], [21] e [41].



**Figura 4.8:** Fractal de Mandelbrot. **Fonte:** [Wikipédia]



**Figura 4.9:** Ampliação de um brócolis, onde se pode ver a estrutura fractal. **Fonte:** [Wikipédia]

### *A Correspondência dos Gradientes de Pressão*

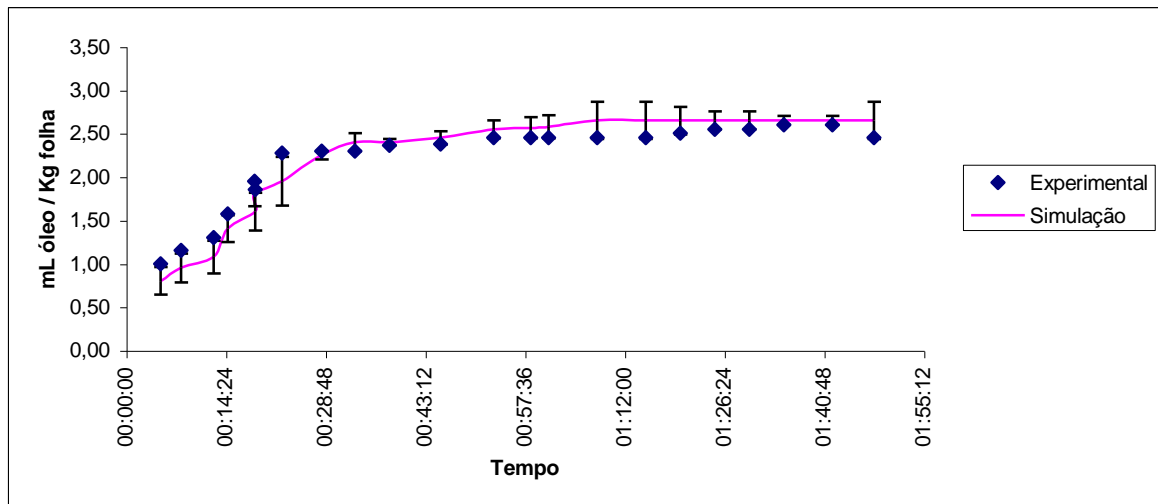
Para simular o sistema completo, separa-se este em inúmeras redes interconectadas. Redes estas de  $1 \text{ cm}^3$  cuja densidade de probabilidade de tamanho de caminhos é calculada através do gradiente de pressão interno nas mesmas. Para garantir que o sistema possua auto-similaridade deve-se ter em mente que, mesmo que se esteja em patamares de altura diferentes no meio poroso, os gradientes de pressão dentro deste meio devem ser equivalentes.

Neste ponto, faz-se uma simplificação no modelo assumindo que cada altura,  $h$ , do meio poroso está associada a uma e somente uma pressão, e com isso pode-se dizer que o gradiente de pressão entre duas alturas,  $h$  e  $h + \Delta h$ , está associado às pressões,  $P$  e  $P + \Delta P$ , permitindo garantir que cada rede que representa um volume de  $1 \text{ cm}^3$  do meio poroso, mesmo estando exposta a pressões diferentes, possuirá um gradiente de pressão interno que permitirá a geração de auto-similaridade no sistema. Desta forma, de posse dos dados de densidade de probabilidade de tamanho de caminhos, extraídos em uma única rede, podem-se calcular valores relativos à extração em qualquer escala, basta para isso multiplicar o tamanho do caminho percorrido pela pérola, pelo valor da altura total do sistema, dividido pela aresta lateral da rede.

#### 4.3.4.3 O Ensaio em Escala Piloto

Para verificar a validade do modelo em sua abordagem fractal, foram utilizados os mesmos dados de construção de rede do problema de bancada, só que neste ensaio, levando em conta a altura do novo sistema.

Na realização da simulação, utilizou-se novamente o pseudo-composto que representa o óleo essencial. Com isso, os seguintes resultados foram verificados (Figura 4.10):



**Figura 4.10:** Extração de óleo essencial em planta piloto simulada.

Pode-se observar, pelos resultados obtidos, que a abordagem da pérola consegue simular corretamente o sistema. O desvio entre os dados experimentais e os simulados foi de 7,67%.

A extrapolação de escala mostrou dois aspectos fundamentais da abordagem: o primeiro é a melhora na determinação dos valores extraídos no início do processo e o segundo é a sensível queda na produção de óleo essencial.

A queda na produtividade, segundo a simulação, é fruto da saturação do vapor ascendente, uma vez que, na fase vapor todos os componentes são miscíveis em quaisquer concentrações, a partir de determinado ponto, a concentração de óleo essencial no interior da folha passa a ser menor que a concentração na pérola de vapor, invertendo o sentido da transferência de massa.

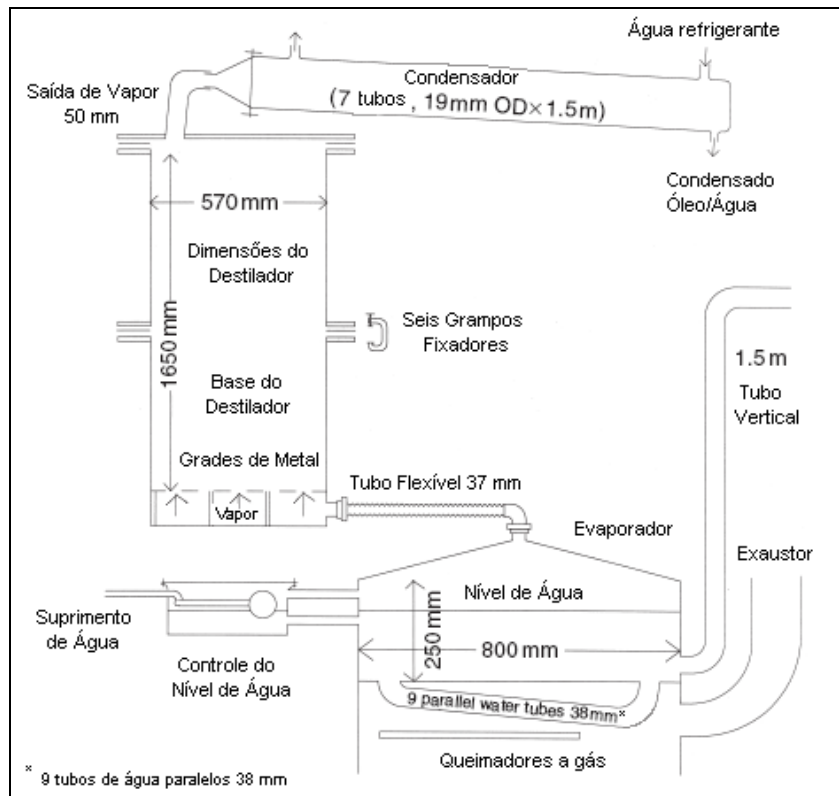
#### 4.3.4.4 A Escala Industrial

Após a validação do modelo de extração proposto, o próximo passo foi a simulação de um processo real de extração de óleo essencial de eucalipto.

Tal processo se dá em instalações semelhantes à da Figura 4.11, que consegue acomodar em média 2,5 toneladas de folhas por batelada. A altura de uma instalação destas é da ordem de 1,65 metros como pode ser visto na literatura [1].

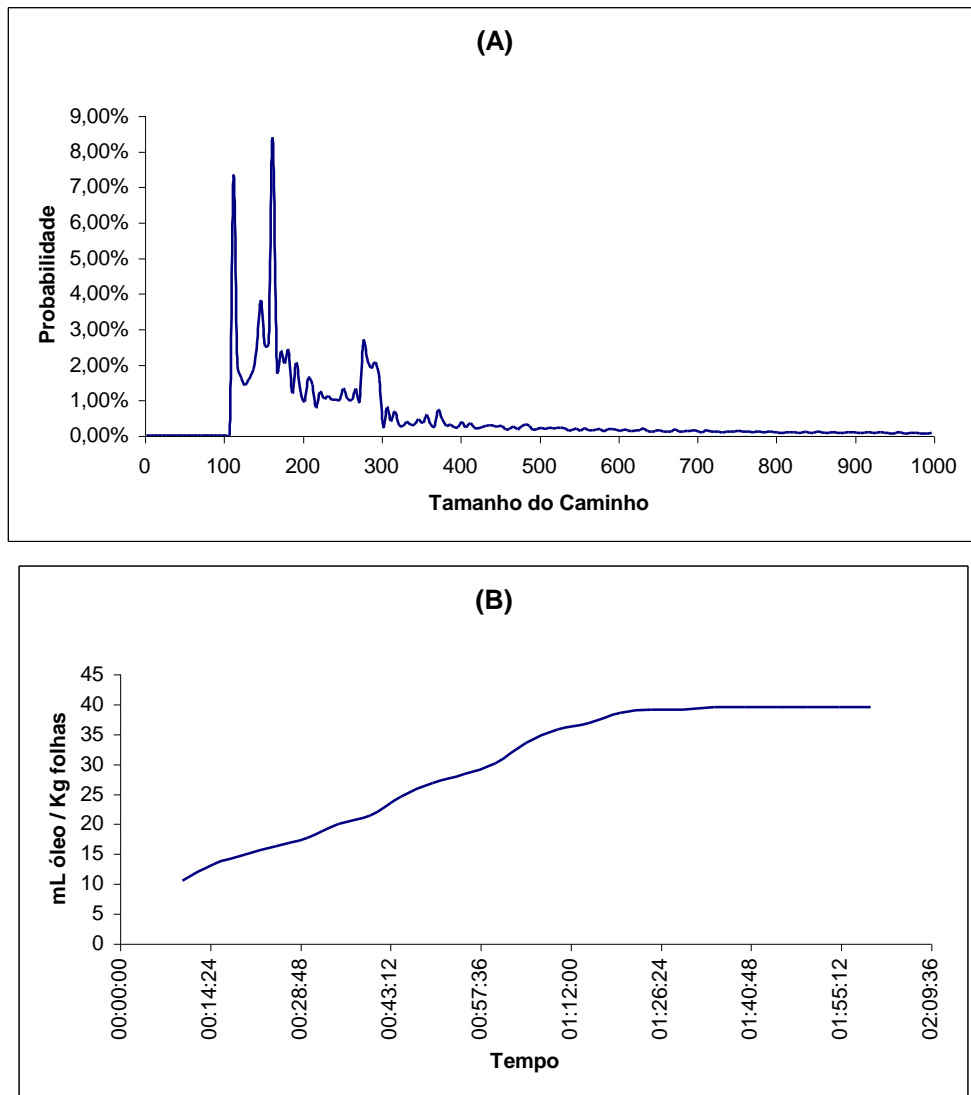
Na simulação foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Folhas picadas seguindo a distribuição de tamanho da Figura 3.6;
- Pressão na caldeira de 7 atm;
- Pressão no condensador 1 atm;
- Porosidade do sistema de 0,24;
- Volume de vapor injetado no sistema de 1000 L/h;
- Tempo de transferência de massa de 0,6 s;
- Medidas do equipamento, sendo estas 10x as da Figura 4.11.



**Figura 4.11:** Destilador piloto. Fonte: Coppen, 2002 [1].

Procedendo-se à simulação de uma extração com duas horas de duração, chegou-se aos seguintes resultados (Figura 4.12).



**Figura 4.12:** (A) Densidade de probabilidade de tamanho de caminho. (B) Curva cinética de extração em escala industrial.

O valor encontrado para a extração de óleo de eucalipto está em torno de 39,5 mL de óleo por kg de folhas. O valor encontrado na literatura [1] é de cerca de 34 mL de óleo por kg de folhas. Pode-se verificar, portanto, que o modelo proposto é válido e permite uma correta avaliação da cinética do processo de extração.

A extração máxima foi alcançada no tempo em torno de 1 hora e 35 minutos, mas pode-se perceber que a partir de 1 hora e 25 minutos não houve avanço considerável na produção de óleo. Novamente a literatura [1] aponta que o tempo ideal de extração é cerca de 1 hora com uma produção de aproximadamente 34 mL de óleo / kg de folha. Na simulação, o valor de 33,5 mL de óleo / kg de folha foi alcançado em 1 hora e 5 minutos, o que mostra a concordância do modelo com os dados presentes na literatura.

Pode-se concluir que o modelo proposto consegue simular de forma adequada a extração de óleo essencial de eucalipto em várias escalas de produção, apresentando desvios na estimação da quantidade final de óleo essencial menores que 3%.

## Capítulo 5: Análise de Viabilidade Econômica do Projeto

É importante ter em mente um dos objetivos deste projeto, que é mostrar que a introdução de uma cooperativa para produção de óleo essencial de eucalipto, em uma comunidade rural de subsistência, pode incrementar a renda do pequeno agricultor, por meio de uma cultura que já é normalmente implantada nas áreas ociosas da propriedade.

Vale ressaltar que a implementação de uma unidade de produção de óleos essenciais permite que sejam criados empregos diretos e indiretos, aumenta a arrecadação do município e pelo caráter do processo, permite que a planta funcione o ano inteiro utilizando outras culturas para a produção de óleo essencial. Além do mais o efeito deste processo impede que os caules do eucalipto adquiram uma espessura maior que alguns poucos centímetros, inibindo empreendimentos que fazem uso ilegal da madeira.

### 5.1 Análise do Impacto da Produção de Óleo Essencial sobre a Cultura do Eucalipto: O ponto de Vista do Agricultor.

Segundo dados do IBGE, a maioria das pequenas propriedades de subsistência no Brasil é menor que oito hectares, sendo majoritariamente dedicada à agricultura familiar e/ou criação de gado leiteiro, o que deixa cerca de 25% do terreno sem uso específico, ou dedicado à rotação de culturas. Por isso, o cenário estudado foi o de um pequeno agricultor que utiliza 25% do seu terreno para a plantação de eucalipto e após quitar o saldo devedor guarda os lucros na poupança.

Os dados utilizados para o cenário estão compilados na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1:** Valores utilizados na simulação.

| Item                     | Madeira / Carvão                   | Óleo                            | Referência |
|--------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------|
| Área Plantada            | 2 hectares                         |                                 | IBGE       |
| Forma de Plantio         | 1.800 plantas / ha                 | 8.000 plantas / ha              | [5]        |
| Juros do Banco           | 4% a.a.                            |                                 | [4]        |
| Carbono Fixado           | 10 t / (ha.ano)                    | 45 t / (ha.ano)                 | [4]        |
| Crédito de Carbono       | R\$ 10,00 / (t.ano)                |                                 | [4]        |
| Produtividade de Madeira | 140   280   380 m <sup>3</sup> (*) | 623 m <sup>3</sup> / (ha.corte) | [4]        |
| Produtividade de Folhas  | -                                  | 45 t / (ha.colheita)            | [5]        |
| Cortes                   | 6 e 12 anos                        |                                 | [4]        |
| Colheita de Folhas       | -                                  | 1 vez ao ano                    | [5]        |
| Juros da Poupança        | 6% a.a.                            |                                 | BC**       |

(\*) respectivamente: madeira para energia, madeira para serraria e madeira para serraria fina. (\*\*) Banco Central.

De posse destes dados, foi possível calcular a estimativa de custos para a cultura de eucalipto, tanto no cenário de produção de óleo essencial, quanto no cenário de produção de madeira. Estes valores podem ser encontrados nas Tabelas 5.2 e 5.3.





**Tabela 5.2:** Planejamento do projeto de plantio de 1 ha de eucalipto para produção de óleo.

| Variável                      | Unidade            | Valor Unit.<br>R\$ | 0         |                       | 1         |                     | 2         |                     |
|-------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|-----------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|
|                               |                    |                    | Qde.      | Total                 | Qde.      | Total               | Qde.      | Total               |
| <b>1. Mecanização</b>         | <b>Hora.trator</b> | <b>R\$ 50,00</b>   | <b>4</b>  | <b>R\$ 200,00</b>     |           |                     |           |                     |
| Aração                        | Hora.trator        | R\$ 50,00          | 2         | R\$ 100,00            |           |                     |           |                     |
| Gradagem                      | Hora.trator        | R\$ 50,00          | 1         | R\$ 50,00             |           |                     |           |                     |
| Subsolagem                    | Hora.trator        | R\$ 50,00          | 1         | R\$ 50,00             |           |                     |           |                     |
| <b>2. Insumos</b>             |                    |                    |           | <b>R\$ 1.828,00</b>   |           | <b>R\$ 200,00</b>   |           | <b>R\$ 200,00</b>   |
| Formicidas                    | kg                 | R\$ 14,00          | 2         | R\$ 28,00             | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            |
| Mudas (+10% replantio)        | Ud.                | R\$ 0,20           | 8000      | R\$ 1.600,00          | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            |
| Fertilizante Químico          | kg                 | R\$ 1,00           | 200       | R\$ 200,00            | 200       | R\$ 200,00          | 200       | R\$ 200,00          |
| <b>3. Mão de Obra</b>         | <b>Homem.dia</b>   | <b>R\$ 20,00</b>   | <b>29</b> | <b>R\$ 580,00</b>     | <b>23</b> | <b>R\$ 460,00</b>   | <b>22</b> | <b>R\$ 440,00</b>   |
| Combate às Formigas           | Homem.dia          | R\$ 20,00          | 1         | R\$ 20,00             | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            |
| Adubação                      | Homem.dia          | R\$ 20,00          | 1         | R\$ 20,00             | 1         | R\$ 20,00           | 1         | R\$ 20,00           |
| Plantio                       | Homem.dia          | R\$ 20,00          | 22        | R\$ 440,00            | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            |
| Capina Manual                 | Homem.dia          | R\$ 20,00          | 5         | R\$ 100,00            | 4         | R\$ 80,00           | 3         | R\$ 60,00           |
| Desrama (poda)                | Homem.dia          | R\$ 20,00          | 0         | R\$ 0,00              | 18        | R\$ 360,00          | 18        | R\$ 360,00          |
| <b>4. Custo Total (1+2+3)</b> |                    |                    |           |                       |           |                     |           |                     |
| <b>5. Produção e Renda</b>    |                    |                    |           | <b>R\$ 0,00</b>       |           | <b>R\$ 6.750,00</b> |           | <b>R\$ 6.750,00</b> |
| Venda de Folhas               | t e R\$            | R\$ 140,00         | 0         | R\$ 0,00              | 45        | R\$ 6.300,00        | 45        | R\$ 6.300,00        |
| Venda de Madeira              | m³ e R\$           | R\$ 30,00          | 0         | R\$ 0,00              | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            |
| Créditos de Carbono           | t e R\$            | R\$ 10,00          | 45        | R\$ 450,00            | 45        | R\$ 450,00          | 45        | R\$ 450,00          |
| <b>6. Total</b>               | <b>m³ e R\$</b>    |                    |           | <b>-R\$ 2.608,00</b>  |           | <b>R\$ 6.090,00</b> |           | <b>R\$ 6.110,00</b> |
| <b>7. VPL</b>                 |                    |                    |           | <b>(R\$ 2.608,00)</b> |           | R\$ 3.122,86        |           | R\$ 8.383,97        |

**Tabela 5.2:** Continuação.

| 3         |                     | 4         |                     | 5         |                      | 6         |                     | 7         |                     |
|-----------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|----------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|
| Qde.      | Total               | Qde.      | Total               | Qde.      | Total                | Qde.      | Total               | Qde.      | Total               |
|           | <b>R\$ 200,00</b>   |           | <b>R\$ 200,00</b>   |           | <b>R\$ 200,00</b>    |           | <b>R\$ 200,00</b>   |           | <b>R\$ 200,00</b>   |
| 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00             | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            |
| 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00             | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            |
| 200       | R\$ 200,00          | 200       | R\$ 200,00          | 200       | R\$ 200,00           | 200       | R\$ 200,00          | 200       | R\$ 200,00          |
| <b>21</b> | <b>R\$ 420,00</b>   | <b>21</b> | <b>R\$ 420,00</b>   | <b>21</b> | <b>R\$ 420,00</b>    | <b>21</b> | <b>R\$ 420,00</b>   | <b>21</b> | <b>R\$ 420,00</b>   |
| 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00             | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            |
| 1         | R\$ 20,00           | 1         | R\$ 20,00           | 1         | R\$ 20,00            | 1         | R\$ 20,00           | 1         | R\$ 20,00           |
| 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00             | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            |
| 2         | R\$ 40,00           | 2         | R\$ 40,00           | 2         | R\$ 40,00            | 2         | R\$ 40,00           | 2         | R\$ 40,00           |
| 18        | R\$ 360,00          | 18        | R\$ 360,00          | 18        | R\$ 360,00           | 18        | R\$ 360,00          | 18        | R\$ 360,00          |
|           | <b>R\$ 6.750,00</b> |           | <b>R\$ 6.750,00</b> |           | <b>R\$ 25.440,00</b> |           | <b>R\$ 6.750,00</b> |           | <b>R\$ 6.750,00</b> |
| 45        | R\$ 6.300,00        | 45        | R\$ 6.300,00        | 45        | R\$ 6.300,00         | 45        | R\$ 6.300,00        | 45        | R\$ 6.300,00        |
| 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            | 623       | R\$ 18.690,00        | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            |
| 45        | R\$ 450,00          | 45        | R\$ 450,00          | 45        | R\$ 450,00           | 45        | R\$ 450,00          | 45        | R\$ 450,00          |
|           | <b>R\$ 6.130,00</b> |           | <b>R\$ 6.130,00</b> |           | <b>R\$ 24.820,00</b> |           | <b>R\$ 6.130,00</b> |           | <b>R\$ 6.130,00</b> |
|           | R\$ 13.365,08       |           | R\$ 18.064,25       |           | R\$ 39.131,45        |           | R\$ 42.372,14       |           | R\$ 45.429,40       |

**Tabela 5.2:** Continuação

| 8         |                     | 9         |                     | 10        |                     | 11        |                      |
|-----------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|----------------------|
| Qde.      | Total               | Qde.      | Total               | Qde.      | Total               | Qde.      | Total                |
|           | <b>R\$ 200,00</b>   |           | <b>R\$ 200,00</b>   |           | <b>R\$ 200,00</b>   |           | <b>R\$ 200,00</b>    |
| 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00             |
| 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00             |
| 200       | R\$ 200,00          | 200       | R\$ 200,00          | 200       | R\$ 200,00          | 200       | R\$ 200,00           |
| <b>21</b> | <b>R\$ 420,00</b>   | <b>21</b> | <b>R\$ 420,00</b>   | <b>21</b> | <b>R\$ 420,00</b>   | <b>21</b> | <b>R\$ 420,00</b>    |
| 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00             |
| 1         | R\$ 20,00           | 1         | R\$ 20,00           | 1         | R\$ 20,00           | 1         | R\$ 20,00            |
| 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00             |
| 2         | R\$ 40,00           | 2         | R\$ 40,00           | 2         | R\$ 40,00           | 2         | R\$ 40,00            |
| 18        | R\$ 360,00          | 18        | R\$ 360,00          | 18        | R\$ 360,00          | 18        | R\$ 360,00           |
|           | <b>R\$ 6.750,00</b> |           | <b>R\$ 6.750,00</b> |           | <b>R\$ 6.750,00</b> |           | <b>R\$ 25.440,00</b> |
| 45        | R\$ 6.300,00        | 45        | R\$ 6.300,00        | 45        | R\$ 6.300,00        | 45        | R\$ 6.300,00         |
| 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            | 0         | R\$ 0,00            | 623       | R\$ 18.690,00        |
| 45        | R\$ 450,00          | 45        | R\$ 450,00          | 45        | R\$ 450,00          | 45        | R\$ 450,00           |
|           | <b>R\$ 6.130,00</b> |           | <b>R\$ 6.130,00</b> |           | <b>R\$ 6.130,00</b> |           | <b>R\$ 24.820,00</b> |
|           | R\$ 48.313,60       |           | R\$ 51.034,55       |           | R\$ 53.601,48       |           | R\$ 72.657,14        |

**Tabela 5.3:** Planejamento do projeto de plantio de 1 ha de eucalipto para produção de madeira / carvão.

| Variável                      | Unidade            | Valor Unit.<br>R\$ | 0         |                     | 1        |                       | 2        |                       |
|-------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|---------------------|----------|-----------------------|----------|-----------------------|
|                               |                    |                    | Qde.      | Total               | Qde.     | Total                 | Qde.     | Total                 |
| <b>1. Mecanização</b>         | <b>Hora.trator</b> | <b>R\$ 50,00</b>   | <b>4</b>  | <b>R\$ 200,00</b>   |          |                       |          |                       |
| Aração                        | Hora.trator        | R\$ 50,00          | 2         | R\$ 100,00          |          |                       |          |                       |
| Gradagem                      | Hora.trator        | R\$ 50,00          | 1         | R\$ 50,00           |          |                       |          |                       |
| Solsolagem                    | Hora.trator        | R\$ 50,00          | 1         | R\$ 50,00           |          |                       |          |                       |
| <b>2. Insumos</b>             |                    |                    |           | <b>R\$ 594,80</b>   |          | <b>R\$ 200,00</b>     |          | <b>R\$ 200,00</b>     |
| Formicidas                    | kg                 | R\$ 14,00          | 2         | R\$ 28,00           | 0        | R\$ 0,00              | 0        | R\$ 0,00              |
| Mudas (+10% replantio)        | Ud.                | R\$ 0,20           | 1834      | R\$ 366,80          | 0        | R\$ 0,00              | 0        | R\$ 0,00              |
| Fertilizante Químico          | kg                 | R\$ 1,00           | 200       | R\$ 200,00          | 200      | R\$ 200,00            | 200      | R\$ 200,00            |
| <b>3. Mão de Obra</b>         | <b>Homem.dia</b>   | <b>R\$ 20,00</b>   | <b>12</b> | <b>R\$ 240,00</b>   | <b>9</b> | <b>R\$ 180,00</b>     | <b>8</b> | <b>R\$ 160,00</b>     |
| Combate às Formigas           | Homem.dia          | R\$ 20,00          | 1         | R\$ 20,00           | 0        | R\$ 0,00              | 0        | R\$ 0,00              |
| Adubação                      | Homem.dia          | R\$ 20,00          | 1         | R\$ 20,00           | 1        | R\$ 20,00             | 1        | R\$ 20,00             |
| Plantio                       | Homem.dia          | R\$ 20,00          | 5         | R\$ 100,00          | 0        | R\$ 0,00              | 0        | R\$ 0,00              |
| Capina Manual                 | Homem.dia          | R\$ 20,00          | 5         | R\$ 100,00          | 4        | R\$ 80,00             | 3        | R\$ 60,00             |
| Desrama (poda)                | Homem.dia          | R\$ 20,00          | 0         | R\$ 0,00            | 4        | R\$ 80,00             | 4        | R\$ 80,00             |
| <b>4. Custo Total (1+2+3)</b> |                    |                    |           |                     |          |                       |          |                       |
| <b>5. Produção e Renda</b>    |                    |                    |           | <b>R\$ 100,00</b>   |          | <b>R\$ 100,00</b>     |          | <b>R\$ 100,00</b>     |
| Madeira pa Energia            | t e R\$            | R\$ 30,00          | 0         | R\$ 0,00            | 0        | R\$ 0,00              | 0        | R\$ 0,00              |
| Madeira para serraria         | m³ e R\$           | R\$ 75,00          | 0         | R\$ 0,00            | 0        | R\$ 0,00              | 0        | R\$ 0,00              |
| Crédito de carbono            | t e R\$            | R\$ 10,00          | 10        | R\$ 100,00          | 10       | R\$ 100,00            | 10       | R\$ 100,00            |
| <b>6. Total</b>               | <b>m³ e R\$</b>    |                    |           | <b>-R\$ 934,80</b>  |          | <b>-R\$ 280,00</b>    |          | <b>-R\$ 260,00</b>    |
| <b>7. VPL</b>                 |                    |                    |           | <b>(R\$ 934,80)</b> |          | <b>(R\$ 1.157,72)</b> |          | <b>(R\$ 1.353,58)</b> |

**Tabela 5.3:** Continuação.

| 3        |                    | 4        |                    | 5        |                    | 6        |                     | 7        |                    |
|----------|--------------------|----------|--------------------|----------|--------------------|----------|---------------------|----------|--------------------|
| Qde.     | Total              | Qde.     | Total              | Qde.     | Total              | Qde.     | Total               | Qde.     | Total              |
|          | <b>R\$ 200,00</b>  |          | <b>R\$ 200,00</b>  |          | <b>R\$ 200,00</b>  |          | <b>R\$ 200,00</b>   |          | <b>R\$ 200,00</b>  |
| 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00            | 0        | R\$ 0,00           |
| 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00            | 0        | R\$ 0,00           |
| 200      | R\$ 200,00         | 200      | R\$ 200,00         | 200      | R\$ 200,00         | 200      | R\$ 200,00          | 200      | R\$ 200,00         |
| <b>6</b> | <b>R\$ 120,00</b>  | <b>6</b> | <b>R\$ 120,00</b>  | <b>6</b> | <b>R\$ 120,00</b>  | <b>6</b> | <b>R\$ 120,00</b>   | <b>6</b> | <b>R\$ 120,00</b>  |
| 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00            | 0        | R\$ 0,00           |
| 1        | R\$ 20,00          | 1        | R\$ 20,00          | 1        | R\$ 20,00          | 1        | R\$ 20,00           | 1        | R\$ 20,00          |
| 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00            | 0        | R\$ 0,00           |
| 2        | R\$ 40,00          | 2        | R\$ 40,00          | 2        | R\$ 40,00          | 2        | R\$ 40,00           | 2        | R\$ 40,00          |
| 3        | R\$ 60,00          | 3        | R\$ 60,00          | 3        | R\$ 60,00          | 3        | R\$ 60,00           | 3        | R\$ 60,00          |
|          | <b>R\$ 100,00</b>  |          | <b>R\$ 100,00</b>  |          | <b>R\$ 100,00</b>  |          | <b>R\$ 4.300,00</b> |          | <b>R\$ 100,00</b>  |
| 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 140      | R\$ 4.200,00        | 0        | R\$ 0,00           |
| 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00            | 0        | R\$ 0,00           |
| 10       | R\$ 100,00         | 10       | R\$ 100,00         | 10       | R\$ 100,00         | 10       | R\$ 100,00          | 10       | R\$ 100,00         |
|          | <b>-R\$ 220,00</b> |          | <b>-R\$ 220,00</b> |          | <b>-R\$ 220,00</b> |          | <b>R\$ 3.980,00</b> |          | <b>-R\$ 220,00</b> |
|          | (R\$ 1.504,92)     |          | (R\$ 1.650,44)     |          | (R\$ 1.790,37)     |          | R\$ 1.853,16        |          | R\$ 1.552,47       |

**Tabela 5.3:** Continuação.

| 8        |                    | 9        |                    | 10       |                    | 11       |                      |
|----------|--------------------|----------|--------------------|----------|--------------------|----------|----------------------|
| Qde.     | Total              | Qde.     | Total              | Qde.     | Total              | Qde.     | Total                |
|          | <b>R\$ 200,00</b>  |          | <b>R\$ 200,00</b>  |          | <b>R\$ 200,00</b>  |          | <b>R\$ 200,00</b>    |
| 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00             |
| 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00             |
| 200      | R\$ 200,00         | 200      | R\$ 200,00         | 200      | R\$ 200,00         | 200      | R\$ 200,00           |
| <b>6</b> | <b>R\$ 120,00</b>  | <b>6</b> | <b>R\$ 120,00</b>  | <b>6</b> | <b>R\$ 120,00</b>  | <b>6</b> | <b>R\$ 120,00</b>    |
| 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00             |
| 1        | R\$ 20,00          | 1        | R\$ 20,00          | 1        | R\$ 20,00          | 1        | R\$ 20,00            |
| 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00             |
| 2        | R\$ 40,00          | 2        | R\$ 40,00          | 2        | R\$ 40,00          | 2        | R\$ 40,00            |
| 3        | R\$ 60,00          | 3        | R\$ 60,00          | 3        | R\$ 60,00          | 3        | R\$ 60,00            |
|          | <b>R\$ 100,00</b>  |          | <b>R\$ 100,00</b>  |          | <b>R\$ 100,00</b>  |          | <b>R\$ 21.100,00</b> |
| 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00             |
| 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 0        | R\$ 0,00           | 280      | R\$ 21.000,00        |
| 10       | R\$ 100,00         | 10       | R\$ 100,00         | 10       | R\$ 100,00         | 10       | R\$ 100,00           |
|          | <b>-R\$ 220,00</b> |          | <b>-R\$ 220,00</b> |          | <b>-R\$ 220,00</b> |          | <b>R\$ 20.780,00</b> |
|          | R\$ 1.268,79       |          | R\$ 1.001,17       |          | R\$ 748,71         |          | R\$ 19.200,45        |

Pode-se verificar que do ponto de vista do agricultor, a produção de óleo essencial de eucalipto é muito mais vantajosa do que a produção de madeira. No primeiro cenário proposto o investimento inicial é pago no segundo ano de cultura. Posteriormente, fluxos de caixa positivos de no mínimo R\$ 5.640,00 por ano, gerando ao final do período de 12 anos um valor presente líquido de R\$ 72.657,14 contra um valor presente líquido de R\$ 19.200,00 da produção de madeira.

## 5.2 Análise da Implementação de uma Planta de Extração de Óleo Essencial de Eucalipto: O Ponto de Vista do Investidor.

A produção do óleo essencial de eucalipto é feita em plantas relativamente simples, que requerem baixo investimento em tecnologia.

Serão utilizados os parâmetros da Tabela 5.4 para estimar os custos.

**Tabela 5.4:** Itens do projeto.

| Item                             | Valores  |
|----------------------------------|--|
| Custos de Equipamento            | Dados na Tabela 5.5  |
| Custo de Utilidades              | R\$ 33,34 / t  |
| Custo das Folhas                 | R\$ 140,00 / t   |
| Custo do Combustível (lenha)     | R\$ 30,00 / m <sup>3</sup> - já incluído no custo das utilidades |
| Custo das Embalagens             | R\$ 10,00 / unidade de 200 litros de plástico                    |
| Capacidade da Planta             | 2,5 t / h  |
| Projeto de unidade de destilação | Fig. 5.1   |
| Homem.ano                        | R\$ 6.710,00   R\$ 12.000,00   R\$ 50.000,00                     |
| Turnos                           | 3  |
| Operadores por turno             | 2  |
| Pessoal administrativo           | 3 + 1 engenheiro   |
| Horas de Produção / ano          | 7200h  |
| Taxa do Empréstimo               | 7,5% aa. (BNDES)   |

**Tabela 5.5:** Detalhamento simplificado do projeto.

| Detalhes do Projeto    | Valores   | Referência |
|------------------------|---|------------|
| Bomba                  | 0,3 m <sup>3</sup> / h   5 HP                                       | [1]        |
| Caldeiras              | 8 atm   300 kg / h  | [1]        |
| Colunas de Destilação  | Coluna simples   altura: 1.650 mm   diâmetro: 570 mm                | [1]        |
| Decantador             | altura: 300 mm   diâmetro interno: 90 mm   diâmetro externo: 370 mm | [1]        |
| Moinho de Facas        | Capacidade: > 2,5 t/h   10 HP                                       | [1]        |
| Tanque                 | Capacidade 10.000 l (diâmetro: 2,5m   altura: 2 m) de aço           | [1]        |
| Tratamento de Efluente | Primário + Secundário + Terciário                                   | -          |
| Trocador de Calor      | Área total: 0,7 m <sup>2</sup> = 7,5 ft <sup>2</sup>                | [1]        |
| Edificações            | 6.250 m <sup>2</sup> construídos                                    | [1]        |

As estimativas foram baseadas inicialmente nos dados apresentados em [42], com o índice de correção *Chemical Engineering Process Coast Index* (CEPCI) de outubro de 2007. Entretanto, os valores encontrados estavam completamente fora da realidade brasileira, uma vez que um trocador de calor de 0,7 m<sup>2</sup> de área para condensar a mistura água + óleo essencial teve um custo estimado de aproximadamente R\$ 10.000,00 e uma caldeira de 300 kg vapor/h com pressão de trabalho de 7 bar foi estimada como USD 800.000,00. Por esta razão, foram utilizados como fonte de preço, sites de leilão de equipamentos agrícolas e industriais usados. A fim de estimar o custo do equipamento novo, foi considerado que no momento do anúncio, o equipamento possuía uma depreciação de 25% sobre o seu valor quando novo, assim como consertos e/ou manutenção que deveriam ser feitos no valor de aproximadamente 15% do valor de venda e também foi considerado um valor de 5% do valor do equipamento novo para possíveis alterações e/ou itens não levados em conta.

As principais fontes foram [43] e [44]. Quando algum equipamento não era encontrado, utilizava-se o seu equivalente a fim de estimar um preço (interpolando ou extrapolando capacidades, segundo correlações presentes em [42]). Os resultados são mostrados na Tabela 5.6.

**Tabela 5.6:** Custos Estimados de Equipamentos e Serviços.

| <b>Equipamento</b>                        | <b>Preço do Usado (R\$)</b> | <b>Correção (R\$)</b> | <b>Preço do Novo (R\$)</b> |
|---|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Caldeira                                  | 15.000,00                   | 9.767,80              | 24.767,80                  |
| Coluna de Destilação                      | 54.168,00                   | 2.850,00              | 57.018,00                  |
| Tanque                                    | 2.600,00                    | 1.693,00              | 4.293,00                   |
| Moinho de Facas                           | 8.000,00                    | 5.209,00              | 13.209,00                  |
| Trocador de Calor                         | 5.000,00                    | 3.256,00              | 8.256,00                   |
| Decantador                                | 800,00                      | 521,00                | 1.321,00                   |
| Bombas + Motor                            | 2.500,00                    | 1.628,00              | 4.128,00                   |
| Trator                                    | -                           | -                     | 44.000,00                  |
| Custo Unitário Básico da Construção Civil | -                           | -                     | 900,00/m <sup>2</sup>      |

A Tabela 5.7 apresenta a estimativa para a implementação de uma unidade de extração de óleo essencial de eucalipto.



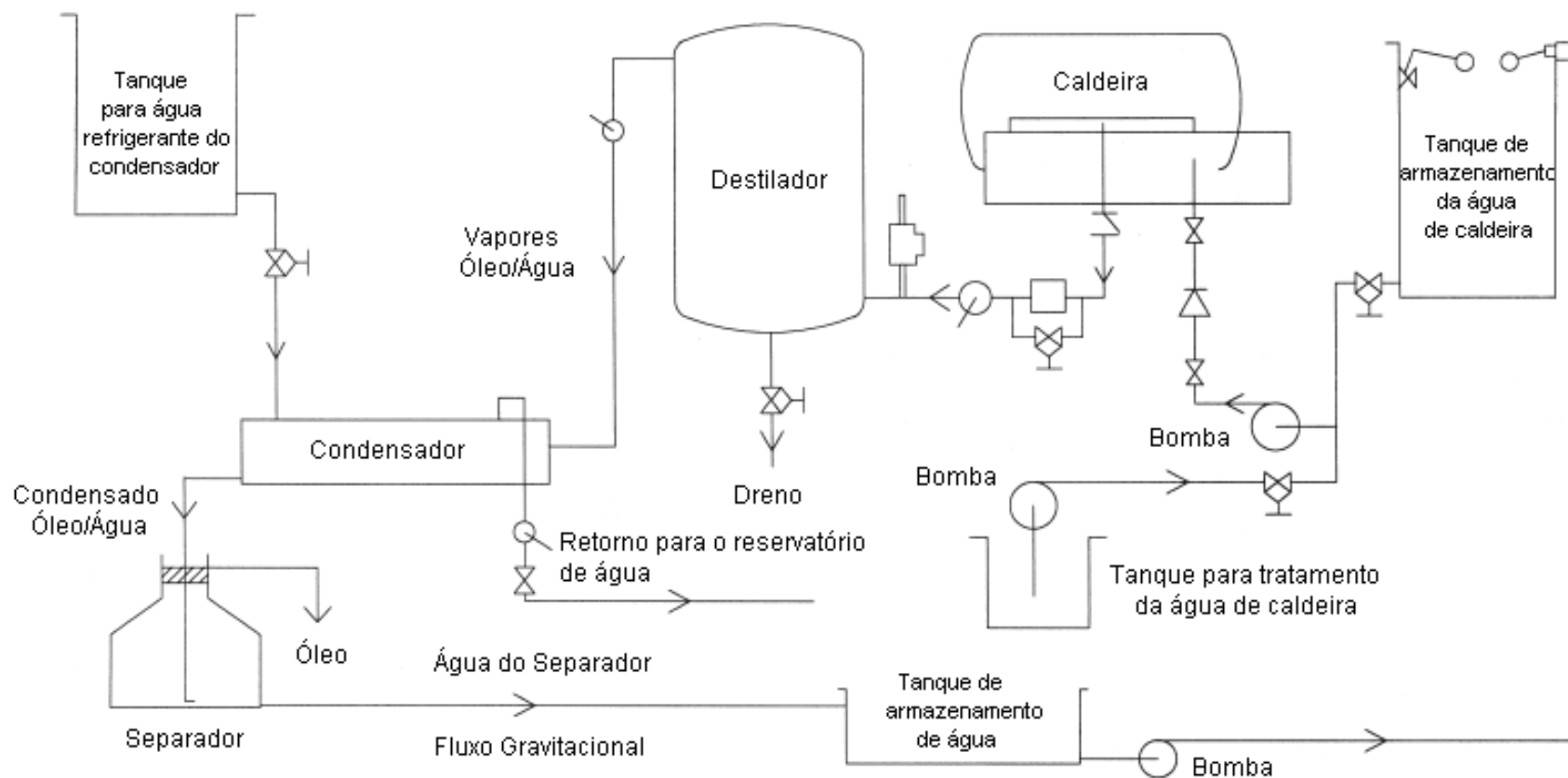


**Tabela 5.7:** Estimativa de custos para implementação do projeto.

| Serviço                   | Unidade   | Preço Unitário | Ano 0 |                          | Ano 1  |                           |
|---------------------------|-----------|----------------|-------|--------------------------|--------|---------------------------|
|                           |           |                | Qtde. | \$                       | Qtde.  | \$                        |
| <b>1 - Maquinaria</b>     |           |                |       | <b>R\$ 5.851.559,80</b>  |        | <b>R\$ 0,00</b>           |
| Caldeira                  | Ud.       | R\$ 24.767,80  | 1     | R\$ 24.767,80            |        | R\$ 0,00                  |
| Dorna                     | Ud.       | R\$ 57.018,00  | 2     | R\$ 114.036,00           |        | R\$ 0,00                  |
| Condensador               | Ud.       | R\$ 8.256,00   | 1     | R\$ 8.256,00             |        | R\$ 0,00                  |
| Separador                 | Ud.       | R\$ 1.321,00   | 1     | R\$ 1.321,00             |        | R\$ 0,00                  |
| Tanques                   | Ud.       | R\$ 4.293,00   | 2     | R\$ 8.586,00             |        | R\$ 0,00                  |
| Bombas                    | Ud.       | R\$ 4.128,00   | 3     | R\$ 12.384,00            |        | R\$ 0,00                  |
| Moinho de Facas           | Ud.       | R\$ 13.209,00  | 1     | R\$ 13.209,00            |        | R\$ 0,00                  |
| Instalações e Edificações | m²        | R\$ 900,00     | 6250  | R\$ 5.625.000,00         |        | R\$ 0,00                  |
| Trator                    | Ud.       | R\$ 44.000,00  | 1     | R\$ 44.000,00            |        | R\$ 0,00                  |
| <b>2 - Matéria-Prima</b>  |           |                |       | <b>R\$ 0,00</b>          |        | <b>R\$ 2.678.920,00</b>   |
| Utilidades                | t         | R\$ 44,64      | 0     | R\$ 0,00                 | 3000   | R\$ 133.920,00            |
| Folhas                    | t         | R\$ 140,00     | 0     | R\$ 0,00                 | 18000  | R\$ 2.520.000,00          |
| Embalagens                | Ud.       | R\$ 10,00      | 0     | R\$ 0,00                 | 2500   | R\$ 25.000,00             |
| <b>3 - Pessoal</b>        |           |                |       | <b>R\$ 153.100,00</b>    |        | <b>R\$ 153.100,00</b>     |
| Administração             | Homem.Ano | R\$ 12.000,00  | 3     | R\$ 36.000,00            | 3      | R\$ 36.000,00             |
| Operadores                | Homem.Ano | R\$ 6.710,00   | 10    | R\$ 67.100,00            | 10     | R\$ 67.100,00             |
| Engenheiro                | Homem.Ano | R\$ 50.000,00  | 1     | R\$ 50.000,00            | 1      | R\$ 50.000,00             |
| <b>5 - Custos</b>         | -         |                |       | <b>R\$ 6.004.659,80</b>  |        | <b>R\$ 2.832.020,00</b>   |
| <b>6 - Receitas</b>       |           |                |       |                          |        |                           |
| Venda de Óleo             | L & R\$   | R\$ 6,00       |       | R\$ 0,00                 | 711000 | R\$ 4.266.000,00          |
| <b>TOTAL</b>              |           |                |       | <b>-R\$ 6.004.659,80</b> |        | <b>R\$ 1.433.980,00</b>   |
| <b>VPL</b>                |           |                |       | <b>-R\$ 6.004.659,80</b> |        | <b>(R\$ 4.344.860,39)</b> |

**Tabela 5.7:** Continuação.

| Ano 2  |                         | Ano 3  |                         | Ano 4  |                         | Ano 5  |                         |
|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|
| Qtde.  | \$                      | Qtde.  | \$                      | Qtde.  | \$                      | Qtde.  | \$                      |
|        | <b>R\$ 0,00</b>         |        | <b>R\$ 0,00</b>         |        | <b>R\$ 0,00</b>         |        | <b>R\$ 0,00</b>         |
|        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |
|        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |
|        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |
|        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |
|        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |
|        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |
|        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |
|        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |
|        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |
|        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |        | R\$ 0,00                |
|        | <b>R\$ 2.678.920,00</b> |        | <b>R\$ 2.678.920,00</b> |        | <b>R\$ 2.678.920,00</b> |        | <b>R\$ 2.678.920,00</b> |
| 3000   | R\$ 133.920,00          | 3000   | R\$ 133.920,00          | 3000   | R\$ 133.920,00          | 3000   | R\$ 133.920,00          |
| 18000  | R\$ 2.520.000,00        | 18000  | R\$ 2.520.000,00        | 18000  | R\$ 2.520.000,00        | 18000  | R\$ 2.520.000,00        |
| 2500   | R\$ 25.000,00           | 2500   | R\$ 25.000,00           | 2500   | R\$ 25.000,00           | 2500   | R\$ 25.000,00           |
|        | <b>R\$ 153.100,00</b>   |        | <b>R\$ 153.100,00</b>   |        | <b>R\$ 153.100,00</b>   |        | <b>R\$ 153.100,00</b>   |
| 3      | R\$ 36.000,00           | 3      | R\$ 36.000,00           | 3      | R\$ 36.000,00           | 3      | R\$ 36.000,00           |
| 10     | R\$ 67.100,00           | 10     | R\$ 67.100,00           | 10     | R\$ 67.100,00           | 10     | R\$ 67.100,00           |
| 1      | R\$ 50.000,00           | 1      | R\$ 50.000,00           | 1      | R\$ 50.000,00           | 1      | R\$ 50.000,00           |
|        | <b>R\$ 2.832.020,00</b> |        | <b>R\$ 2.832.020,00</b> |        | <b>R\$ 2.832.020,00</b> |        | <b>R\$ 2.832.020,00</b> |
| 711000 | R\$ 4.266.000,00        | 711000 | R\$ 4.266.000,00        | 711000 | R\$ 4.266.000,00        | 711001 | R\$ 4.266.006,00        |
|        | <b>R\$ 1.433.980,00</b> |        | <b>R\$ 1.433.980,00</b> |        | <b>R\$ 1.433.980,00</b> |        | <b>R\$ 1.433.986,00</b> |
|        | (R\$ 2.800.860,93)      |        | (R\$ 1.364.582,37)      |        | (R\$ 28.509,29)         |        | R\$ 1.214.354,58        |



**Fluxograma 5.1:** Extração de óleo essencial de eucalipto.

(\*) No projeto deste trabalho, foi considerado que existem 2 destiladores dividindo o mesmo sistema, pois enquanto um está operando, o outro está sendo descarregado, limpo e recarregado. **Fonte:** Coppen 2002 [1]

Pode-se verificar que o investimento para a construção da planta é relativamente baixo (quando considerado o processo do Fluxograma 5.1), comparado com a ordem de grandeza dos investimentos para a construção de uma planta química. O projeto também é interessante economicamente, pois o tempo de retorno é relativamente curto.

O investimento para a construção desta planta pode ocorrer em vários cenários, dentre os quais se pode citar um empreendimento em conjunto de agricultores, um projeto da prefeitura local subsidiado pelo Plano de Aceleração do Crescimento (PAC) ou mesmo um investidor interessado em projetos de cunho social.

## Capítulo 6: Discussões Finais

Pode-se concluir a partir dos dados aferidos nos ensaios experimentais e nos ensaios computacionais que a extração de óleo essencial de eucalipto representa uma fonte de renda ímbar em uma pequena comunidade rural de subsistência, onde uma planta de extração poderia impulsionar novas culturas, como, por exemplo, o plantio de Lavanda, Camomila, Hortelã-Pimenta, etc. Culturas estas que utilizam a mesma tecnologia de extração e que, além de incrementar o portfólio da empresa com novos produtos, é de grande interesse de compradores, como Natura ou O Boticário.

Com relação ao objetivo secundário deste trabalho, ou seja, dificultar o acesso de empreendimentos ilegais à matéria-prima, pode-se observar que o mesmo cumpre o seu papel proporcionando uma alternativa sustentável e lucrativa para o micro-empendedor rural.

Do ponto de vista de tecnologia, foi possível definir um modelo matemático que representa o sistema com exatidão da ordem de 90%, no pior dos casos. Tal modelo foi utilizado para proceder ao *scale-up* do processo, mas ele pode ser utilizado, adicionalmente, na otimização do mesmo e também para aferir a quantidade de óleo residual nas folhas que já passaram pela extração – com tais dados é possível promover misturas entre folhas processadas e folhas novas, a fim de aumentar o volume de óleo essencial extraído sem alterar a massa de folhas adquirida por ano, o que aumenta os lucros da planta e permite, em uma possível situação de concorrência entre plantas de extração, uma melhor remuneração para o agricultor.

A principal questão pendente até o momento são os resíduos oriundos do processo: as folhas exauridas e a água utilizada na extração.

Ensaio toxicológicos realizados com sementes de alface mostram que o efluente (água de extração) é tóxico em concentrações menores que 5% (v/v), o que demanda uma unidade de tratamento específica para tal efluente. Uma busca em bases de informação de medicina alternativa sugere que este efluente – que pode ser considerado como chá de eucalipto – pode ser utilizado para o tratamento de gripes e resfriados, assim como outros sugerem que este produto possui sérios efeitos colaterais, caso ingerido. Foge ao escopo deste projeto avaliar a toxicidade ou dimensionar uma unidade de tratamento adequada ao produto, mas é possível afirmar que ensaios mais detalhados devem ser feitos, uma vez que o eucalipto pode ser resistente aos materiais tóxicos presentes no chá, o que permitiria utilizar tal material na irrigação das culturas de eucalipto.

As folhas provenientes da extração podem ser utilizadas de duas maneiras. A mais simples delas é a utilização das mesmas como combustível na caldeira, o que reduzirá os custos com combustível. Outra alternativa, também lucrativa e mais ecologicamente correta, é a implementação de um programa de compostagem. Tal procedimento permitiria, além de uma destinação final para o efluente (utilizado na umidificação das pilhas de formação de composto), vender o material resultante do processo de compostagem (composto) como adubo orgânico para os produtores de eucalipto, o que geraria receita para a empresa.

Pode-se concluir que este trabalho cumpre o objetivo proposto, determinando um modelo pertinente, assim como mostrando que a implementação, tanto da planta, quanto a modificação da cultura de eucalipto pode prover lucros para ambas as partes envolvidas no processo, como também gerar os benefícios sociais abordados na motivação deste trabalho.

## Referências

- [ 1 ] Coppen, J.J.W. – Eucalyptus – The Genus Eucalyptus – Aromatic and Medicinal Industrial Profiles. Taylor and Francis, 2002.
- [ 2 ] Parry, E.J. – The Chemistry of Essential Oils and Artificial Perfumes. 4ª Edição, Wexford College Press, 2007.
- [ 3 ] Dodt, C.K. – The Essential Oils Book: Creating Personal Blends for Mind & Body. Storey Publishing, 1996.
- [ 4 ] Rodigheri, H.R., Graça, L.R., de Lima, M.A. – Indicadores de Custos, Produtividade, Renda e Créditos de Carbono de Plantios de Eucaliptos e Pinus em Pequenas Propriedades Rurais. Comunicado Técnico No. 136. Embrapa, 2005.
- [ 5 ] Vitti, A.M.S., Brito, J.O. – Óleo Essencial de Eucalipto. Documentos Florestais, No. 17, Agosto de 2003. Publicação da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – USP. ISSN 0103-4715.
- [ 6 ] Pereira, M. A. A., Guerini, C., Sholl, W., – Comparativo do Rendimento da Extração de Óleo Essencial Obtido de Folhas de *Eucalyptus grandis* destinada à Produção de Lâminas de Madeira com a Espécie *Eucalyptus citriodora* destinados à Produção de Óleo Essencial. Curso de Especialização em Óleos Essenciais. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.
- [ 7 ] Mahadevan, J., Sharma, M.M., Yortsos, Y.C. – Flow-Through Drying of Porous Media. AIChE Journal, Julho de 2006, Vol. 52, No. 7, páginas 2367 – 2380.
- [ 8 ] Hashemi, M., Kavak, H.I., Tsotsis, T.T., Sahimi, M. – Computer simulation of gas generation and transport in landfills – I: quasi-steady-state condition. Chemical Engineering Science 57 (2002) 2475 – 2501.
- [ 9 ] Sanchez, R., Hashemi, M., Tsotsis, T.T., Sahimi, M. – Computer simulation of gas generation and transport in landfills II: Dynamic conditions. Chemical Engineering Science 61 (2006) 4750 – 4761.
- [ 10 ] Sanchez, R., Tsotsis, T.T., Sahimi, M. – Computer simulation of gas generation and transport in landfills III: Development of landfills’ optimal model. Chemical Engineering Science 62 (2007) 6378 – 6390.
- [ 11 ] Aker, E., Maloy, K.J., Hansen, A., Batrouni, G.G. – A Two-Dimensional Network Simulator for Two-Phase Flow in Porous Media. Transport in Porous Media 32: 163-186, 1998.
- [ 12 ] Coelho, L.A.F., Oliveira, J.V., Pinto, J.C. – Modelagem e Simulação do Processo de Extração Supercrítica do Óleo Essencial de Alecrim. Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos. Vol. 17, No. 4, 1997.

- [ 13 ] Jamshidi, R., Afzali, Z., Afzali, D. – Chemical Composition of Hydrodistillation Essential Oil of Rosemary in Different Origins in Iran and Comparison with Other Countries. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 5 (2009) 78 – 81.
- [ 14 ] Sahimi, M., Hashemi, M., Ghassemzadeh, J. – Site-bond invasion percolation with fluid trapping. *Physica A* 260 (1998) 231 – 243.
- [ 15 ] Chen, F., Mourhatch, R., Tsotsis, T.T., Sahimi, M. – Pore network model of transport and separation of binary gas mixtures in nanoporous membranes. *Journal of Membrane Sciences* 315 (2008) 48 – 57.
- [ 16 ] Dodson, C.T.J., Sampson, W.W. – Spatial Statistics of Stochastic Fiber Networks. *Journal of Statistical Physics*, vol. 96, No. ½, 1999.
- [ 17 ] Monteagudo, J.E.P., Rajagopal, K., Lage, P.L.C – Scaling laws in network models: porous medium property prediction during morphological evolution. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 32 (2001) 179 – 190.
- [ 18 ] Monteagudo, J.E.P., Rajagopal, K., Lage, P.L.C. – Simulation oil flow in porous media under asphaltene deposition. *Chemical Engineering Science*, 57 (2002) 323 – 337.
- [ 19 ] Câmara, L.D.T., Cerqueira, H.S., Aranda, D.A.G., Rajagopal, K. – Application of a three-dimensional network model to the coke formation in FAU, MFI and BEA zeolites. *Catalysis Today*, 98 (2004) 309-314.
- [ 20 ] Stauffer, D., Aharony, A. – Introduction to Percolation Theory. Taylor & Francis, 2003.
- [ 21 ] Barrat, A., Barthélemy, M., Vespignani, A. – Dynamical Processes on Complex Networks. Cambridge University Press, 2008.
- [ 22 ] Matthews, G.P., Moss, A.K., Spearing, M.C., Volland, F. – Network calculation of mercury intrusion and absolute permeability in sandstone and other porous media. *Powder Technology*, 76 (1993) 95 – 107.
- [ 23 ] Moreira, J.C.C.B.R. – Evaporação de Fluidos em Meios Porosos utilizando modelos de redes tridimensionais. Tese de D.Sc. – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- [ 24 ] Joas, C. – Introduction to the Hoshen-Kopelman algorithm and its application to nodal domain statistics. Nodal Week (Weizmann Institute, Rehovot – IL) – Institute für theoretische Physik, FU Berlin, 2006.
- [ 25 ] Welty, J., Wicks, C.E., Rorrer, G., Wilson, R.E. – Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer. 5ª Edição. Wiley, 2007.
- [ 26 ] Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N. – Transport Phenomena. 2ª Edição. Wiley, 2006.
- [ 27 ] Taylor, R., Krishna, R. – Multicomponent Mass Transfer. John Wiley & Sons, 1993.
- [ 28 ] Burden, R.L., Faires, J.D. – Análise Numérica. Thompson.



- [ 29 ] Jaubert, J.N., Vitu, S., Mutelet, F., Corriou, J.P., – Extension of the PPR78 model (predictive 1978, Peng-Robinson EOS with temperature dependent  $k_{ij}$  calculated through a group contribution method) to systems containing aromatic compounds. Fluid Phase Equilibria 237 (2005) 193 – 211.
- [ 30 ] Mutelet, F., Vitu, S., Privat R., Jaubert, J.N. – Solubility of CO<sub>2</sub> in branched alkanes in order to extend the PPR78 model (predictive 1978, Peng-Robinson EOS with temperature dependent  $k_{ij}$  calculated through a group contribution method) to such systems. Fluid Phase Equilibria 238 (2005) 157 – 168.
- [ 31 ] Hansen, H.K., Rasmussen, P., Fredenstund, A., Schiller, M., Gmehling, J – Ind. Eng. Chem. Res. 30, 2352 – 2355, 1991
- [ 32 ] Marrero, J., Gani, R. – Group-contribution based estimation of pure component properties. Fluid Phase Equilibria 183-184 (2001) 183 – 208.
- [ 33 ] Constantinou, L., Gani, R., O’Connell, J.P. – Estimation of the acentric factor and the liquid molar volume at 298 K using a new group contribution method. Fluid Phase Equilibria 103 (1995) 11-22
- [ 34 ] NIST Web Book – <http://webbook.nist.gov> – acessado em 17 de maio de 2009.
- [ 35 ] The Good Scents Company – [www.thegoodscentscompany.com](http://www.thegoodscentscompany.com) – acessado em 17 de maio de 2009.
- [ 36 ] Smith, J.M., Van Ness, H.C., Abbott, M.M. – Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química. 5ª Edição. LTC, 2000.
- [ 37 ] Edalat, M., Bozar-Jomehri, R.B., Mansoori, G.A. Generalized equation predicts vapor pressure of hydrocarbons. Oil and Gas Journal, 1993
- [ 38 ] Peçanha, A.S.R., Queiroz, E.M., Pessoa, F.L.P. – Desenvolvimento de um Método Híbrido de Otimização para Estimação de Parâmetros Termodinâmicos. XXIX CILAMCE – Congresso Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia. página 508, 2008.
- [ 39 ] Reid, R.C., Prausnitz, J.M., Poling, B.E. – The Properties of Gases & Liquids. 4ª Edição. McGraw-Hill Inc, 1987.
- [ 40 ] Galassi, M., Davies, J., Theiler, J., Gough, B., Jungman, G., Booth, M., Rossi, F. – GNU Scientific Library – Reference Manual. Edição 1.8. Versão 1.8 – disponível em: [www.gnu.org/gsl](http://www.gnu.org/gsl), 2006.
- [ 41 ] Nussenzveig, H.M. – Complexidade e Caos. 2ª Edição. Editora da UFRJ, 2003.
- [ 42 ] Seider, W.D., Seader, J.D., Lewin, D.R. – Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation. 2ª Edição. Wiley, 2003.
- [ 43 ] Produtos rurais – <http://www.comprar-vender.mfrural.com.br/> – acessado em 27 de junho de 2009.

[ 44 ] Superbid-Leilão Oficial Online – <http://www.superbid.net/home/> – acessado em 27 de junho de 2009.