



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL

UNIDADE CENTRO DE TECNOLOGIA

CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA



LUCAS SANTANA DA SILVA

MODELO DE REATOR PIROLÍTICO POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

MACEIÓ – AL

2020

LUCAS SANTANA DA SILVA

MODELO DE REATOR PIROLÍTICO POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Química na Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof. Dr. Soraya Lira Alencar

MACEIÓ – AL

2020

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Livia Silva dos Santos – CRB-4 – 1670

S586m Silva, Lucas Santana da.

Modelo de reator pirolítico por indução eletromagnética / Lucas Santana da Silva. –
2020.

41 f. : il.

Orientadora: Soraya Lira Alencar.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química) – Universidade
Federal de Alagoas. Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia. Curso de Engenharia
Química, Maceió, 2020.

Bibliografia: f. 38-39

1. Indução eletromagnética. 2. Pirólise. 3. Craqueamento térmico. 4. Reator pirolítico.
I. Título.

CDU: 66.09



ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 13 dias do mês de Outubro de 2020 realizou-se às 13:00 horas, na sala virtual do **Google Meet** (<https://meet.google.com/uho-fvvy-ece>), a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do discente **LUCAS SANTANA DA SILVA**, Matrícula **12212356**, intitulado: **MODELO DE REATOR PIROLÍTICO POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA**

A apresentação oral do discente foi realizada em **30** minutos, findos os quais o discente foi arguido pelos componentes da Banca Examinadora, perfazendo um tempo total de defesa de **1 hora e 30 minutos**.

O discente obteve nota final (média das notas dos membros da Banca) **9,5 (NOVE INTEIROS E CINCO DÉCIMOS)**, correspondente a um 80% da nota total do TCC. A nota do plano de trabalho do discente foi de **10,0 (DEZ)**, correspondente a um 20% da nota do TCC, desta forma, a nota final do Trabalho de Conclusão de Curso do discente corresponde a **9,6 (NOVE INTEIROS E SEIS DÉCIMOS)**.

E, para constar, foi lavrada a presente ata que vai assinada pelos componentes da Banca Examinadora seguida da nota obtida na defesa do TCC correspondente aos 80% da nota, a assinatura do aluno e a assinatura do Coordenador do TCC do Curso de Engenharia Química.

Maceió, 13 de outubro de 2020.

SORAYA LIRA ALENCAR
(Orientadora),

nota :9,5 (Nove inteiros e cinco décimos)

LIVIA MARIA DE OLIVEIRA RIBEIRO,

nota: 9,5 (Nove inteiros e cinco décimos)

HUGO VALENÇA DE ARAÚJO,

nota: 9,5 (Nove inteiros e cinco décimos)

Discente:

Coordenador do TCC / Engenharia Química:

Wagner Roberto de Oliveira Pimentel
SIAPE: 1545267

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço ao Deus todo poderoso e a minha mãe, Vanuzia Santana, por todo apoio e amor. Agradeço ao meu pai, José Ronaldo, que mesmo com todas as dificuldades nessa jornada acadêmica, mas o tom de sua cobrança sempre foi almejando a minha vitória. Quero agradecer aos meus queridos irmãos, Letícia e Levi, por todo carinho e atenção.

Agradeço a minha esposa, Samira Alexandre, por todo amor, carinho e por me proporcionar tantos momentos de paz e também por sua grande contribuição, me ajudando e incentivando.

A minha orientadora, Soraya Lira, pelas oportunidades que me proporcionou e confiança que depositou em mim com esse trabalho ousado e "fora da curva".

Agradeço aos meus amigos e colegas, e professores como a Livia Maria que também me deu muito incentivo com esse trabalho, ao Professor João Inácio.

Perco as palavras se tentasse explicar o sentimento que tornaram todos estes anos mais agradáveis. A amizade de vocês sempre foi e sempre será muito importante para mim, obrigado por todos momentos, divertimentos, todas as risadas, todo o suporte, e por serem tão influentes em minha vida.

E um agradecimento final a todas as pessoas que estiveram envolvidas em minha vida nestes últimos anos, que de alguma forma contribuíram para que esse objetivo fosse alcançado.

FOLHA DE APROVAÇÃO

LUCAS SANTANA DA SILVA

MODELO DE REATOR PIROLÍTICO POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Soraya Lira Alencar

Prof.^a Dr.^a Soraya Lira Alencar

Banca Examinadora:

Hugo Valença De Araújo

Prof.^a Dr.^a Hugo Valença de Araújo

Livia Maria de Oliveira Ribeiro

Prof.^a Dr.^a Livia Maria de Oliveira Ribeiro

RESUMO

A demanda por fontes alternativas de energia impulsiona o desenvolvimento tecnológico de tal forma que muitos combustíveis e processos de conversão energética, antes julgados como inadequados ou mesmo inviáveis, são agora concorrentes de combustíveis e processos ditos tradicionais. Assim, a biomassa exerce um papel relevante, sendo considerada uma fonte de energia renovável. A biomassa contribui com uma fração significativa da matriz energética brasileira. Vários tipos de processos de pirólise vêm sendo estudados nos últimos anos, destacando-se o processo de pirólise rápida de biomassa para obtenção de bio-óleo. Dentro desse contexto, comparando as linhas de pesquisas na literatura, muitos desenvolvem diferentes configurações em relação ao tipo de leito usado nos reatores ou até mesmo com o auxílio da catálise nos equipamentos pirolíticos, mas utilizando reatores com os mesmos princípios de funcionamento: aquecimento por resistência elétrica, aproveitamento de gases de exaustão (Gaseificação) ou queima de combustíveis fósseis, facilitando o controle das taxas de aquecimento. Porém esses modelos consomem muita energia durante seu funcionamento e também possuem limitações quanto ao seu volume, pois para grandes volumes de reatores há uma diminuição na uniformidade da transferência de calor para a biomassa que se encontra mais centralizada no leito do reator. É característico da engenharia química utilizar conceitos multidisciplinares para obter resultados nos processos e melhoramento em geral, por esse motivo no presente trabalho proposto um modelo quase nunca citado na literatura para o funcionamento de um reator pirolítico, através de um circuito Indutivo/Capacitivo (LC) oscilatório com desenvolvimento de um projeto de um reator para realizar pirólise através da indução eletromagnética. Esse projeto tem objetivo de comparar a eficiência e consumo energético entre os dois tipos de reatores (e verificar suas vantagens e desvantagens de operação em relação ao modelo usado no laboratório, Resistência elétrica, indução eletromagnética), e descrever seus resultados.

Palavras-chaves: Pirólise; Reator por indução eletromagnética.

ABSTRACT

The demand for alternative energy sources drives technological development in such a way that many fuels and energy conversion processes, previously thought to be inadequate or even unfeasible, are now competitors of traditional fuels and processes. Thus, biomass plays an important role, being considered a source of renewable energy. Biomass contributes a significant fraction of the Brazilian energy matrix. Several types of pyrolysis processes have been studied in recent years, with emphasis on the rapid biomass pyrolysis process to obtain bio-oil. Within this context, comparing the lines of research in the literature, many develop different configurations in relation to the type of bed used in the reactors or even with the aid of catalysis in the pyrolytic equipment, but using reactors with the same operating principles: resistance heating electricity, use of exhaust gases (gasification) or burning of fossil fuels, facilitating the control of heating rates. However, these models consume a lot of energy during their operation and also have limitations regarding their volume, since for large reactor volumes there is a decrease in the uniformity of heat transfer to the biomass that is more centralized in the reactor bed. It is characteristic of chemical engineering to use multidisciplinary concepts to obtain results in processes and improvement in general, for this reason in the present work, a model almost never mentioned in the literature for the operation of a pyrolytic reactor, through an Inductive / Capacitive (LC) circuit oscillatory with development of a reactor project to perform pyrolysis through electromagnetic induction. This project aims to compare the efficiency and energy consumption between the two types of reactors (and verify their operating advantages and disadvantages in relation to the model used in the laboratory, Electrical resistance, electromagnetic induction), and describe their results.

Key-words: Pyrolysis; Electromagnetic induction reactor.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Ilustração Pirólise.....	11
FIGURA 2 – Representação da bobina com o cilindro em aço do reator.....	12
FIGURA 3 – Liga metálica incandescente causada pela indução.....	12
FIGURA 4 – Campo magnético induzido.....	14
FIGURA 5 – Efeito pele.....	16
FIGURA 6 – Sistema pirolítico por indução.....	17
FIGURA 7 – Ligação direta placa/fonte.....	18
FIGURA 8 – Reator em aço carbono SAE 1045.....	18
FIGURA 9 – Fonte assimétrica ajustavel.....	19
FIGURA 10 – Cilindro de aço inox 316.....	20
FIGURA 11 – Projeto de reator em cerâmica com haste metálica.....	21
FIGURA 12 – Primeira etapa: disposição dos componentes eletrônicos.....	22
FIGURA 13 – Segunda etapa: ligação das malhas.....	23
FIGURA 14 – Terceira etapa: Roteamento das trilhas.....	23
FIGURA 15 – Quarta etapa: Impressão (PCB).....	24
FIGURA 16 – Dimensões do reator.....	25
FIGURA 17 – Projeto do reator.....	25
FIGURA 18 – Reator pirolítico por resistência elétrica.....	27
FIGURA 19 – Medição com multímetro.....	27
FIGURA 20 – Tabela e gráfico I.....	29
FIGURA 21 -- Tabela e gráfico II.....	30
FIGURA 22 -- Tabela e gráfico II.....	30
FIGURA 23 -- Tabela e gráfico IV.....	32
FIGURA 24 -- Tabela e gráfico V.....	33
FIGURA 25 -- Tabela e gráfico VI.....	33

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	10
2.1 Objetivo Geral.....	10
2.2 Objetivos Específicos.....	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1 Pirólise	11
3.1.1 Pirólise rápida	11
3.2 Indução.....	12
3.2.1 Indução eletromagnética.....	13
3.3 Sistema de aquecimento por indução.....	14
4. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO	17
4.1 Reator por indução eletromagnética.....	17
4.1.1 Funcionamento do reator	18
4.1.2 Limitações do projeto.....	19
4.1.3 Continuidade do projeto... ..	20
5. METODOLOGIA	22
5.1 Construção da placa	22
5.1.2 Construção do reator em aço SAE 1045	24
5.1.3 Funcionamento do sistema por indução e testes	26
5.2 Sistema por resistência elétrica	26
6. RESULTADOS	29
6.1 Reator I Resistencia elétrica.....	29
6.2 Reator II Indução.....	32
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
8. REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

Na busca por um desenvolvimento sustentável, a tecnologia é fundamental. Dentro desse contexto o profissional de Engenharia Química tem uma característica muito versátil devido sua formação de caráter multidisciplinar. O desenvolvimento de nossa sociedade tem como barreira alguns desafios.

O crescimento populacional gera demanda cada vez maior por energia e produz proporcionalmente mais resíduo. Assim, faz-se necessário que esse desenvolvimento seja de fato sustentável (VAZ, 2011).

De maneira simples, o engenheiro químico tem como objetivo profissional transformar matérias-primas em produtos com maior valor agregado, fazendo uso de conhecimentos nas áreas de termodinâmica, fenômenos de transporte, operações unitárias, cinética das reações e projetos de reatores, tendo como ferramentas auxiliares: habilidade em cálculo, conhecimento em biotecnologia, computação e até na área elétrica. Estruturado pela sua formação o engenheiro tem a capacidade de aplicar todas essas ferramentas adquiridas de maneira eficaz em seus projetos.

Os resíduos gerados pela população precisam ser reciclados, e transformá-los em energia é a opção mais conveniente. A engenharia tem a capacidade de gerenciar, projetar e operar, dentro desse contexto, os processos de craqueamento térmico, também conhecidos como pirólise, que tem se mostrado uma alternativa atraente na geração energia por meio da decomposição térmica de biomassa e resíduos como lixo urbano, especialmente na produção de combustíveis através da pirólise rápida.

Nesse processo, utilizam-se reatores com especificações que variam de acordo com a quantidade de biomassa ou de resíduos sólidos em processo. Quando o objetivo é o bio-óleo ou petróleo sintético, a pirólise rápida é mais indicada. Porém, um reator para realizar um processo de pirólise rápida precisa operar com altas taxas de aquecimento, conseqüentemente o consumo de energia é muito elevado devido às limitações das resistências elétricas ou da trajetória do fluxo de potência usada. Os reatores cujo princípio usado é a resistência elétrica são os mais usuais em escala laboratorial devido sua disponibilidade no mercado. O modelo proposto nesse trabalho tem o princípio de funcionamento do aquecimento por indução eletromagnética. Nele, através de um circuito oscilador que gera corrente alternada em uma bobina geradora de campo magnético variável, há a possibilidade de aquecer com taxas muito superiores aos modelos tradicionais devido à trajetória do fluxo de potência ser menor, com menos barreiras, com maior eficiência energética, sendo um modelo interessante para confecção de um reator pirolítico.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Demonstrar a eficiência energética de um reator pirolítico por indução eletromagnética, oferecer uma ferramenta alternativa para pesquisas com pirólises rápidas com um equipamento de baixo custo e fácil manuseio e comparar o consumo energético com um reator por resistência elétrica.

2.2 Objetivos Específicos

- Construir um modelo piloto de um reator pirolítico por indução eletromagnética.
- Mostrar o funcionamento do reator.
- Comparar a eficiência energética do equipamento com um reator resistivo, através dos parâmetros: tensão elétrica, corrente elétrica consumida ao longo do tempo.
- Verificar as taxas de aquecimento em função da tensão elétrica aplicada.
- Apresentar os resultados comparando com um reator por resistência elétrica.

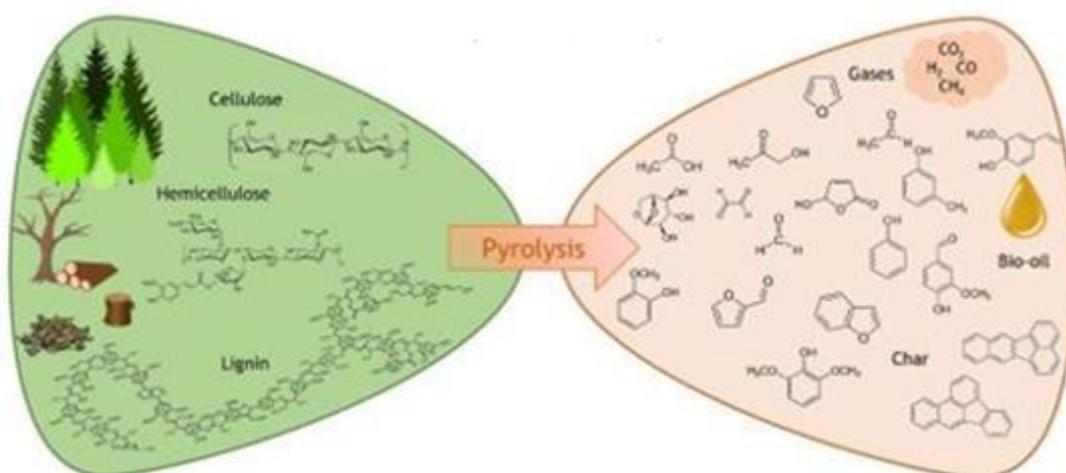
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Pirólise

A pirólise é um dos processos termoquímicos mais eficientes e ambientalmente atraentes para a conversão de biomassa e resíduos em produtos energéticos. É uma reação de decomposição que ocorre pela ação de altas temperaturas. No caso, o que ocorre é uma ruptura da estrutura molecular original de um determinado composto pela ação do calor em um ambiente com pouco ou nenhum oxigênio. (AIRES, LOPES, e BARROS, 2003).

A Figura 1 mostra a dinâmica do processo de decomposição térmica da biomassa e seus produtos.

Figura 1. Ilustração da transformação da biomassa



Fonte: www.advancedsciencenews.com/advances-in-biomass-fast-pyrolysis-kinetics-through-experimentl-techniques.

3.1.1 Pirólise rápida

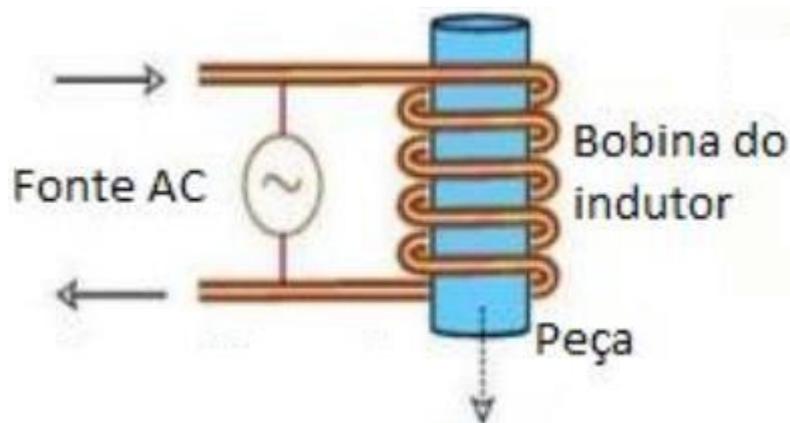
Pirólise rápida se trata de um tipo de pirólise com intensa troca térmica e rápido escoamento de produtos. Seu produto principal é o bio-óleo, uma complexa mistura líquida de compostos orgânicos com diversas possibilidades de aplicação: calor, eletricidade, químicos e combustíveis.

O potencial do bio-óleo é compatível ao petróleo, porém possui algumas limitações que o fazem inferior ao petróleo, por exemplo: úmido, polar e poder calorífico inferior (RESENDE, 2010).

3.2 Indução

O aquecimento por indução ocorre no corpo de prova que é aquecido sem nenhum contato. A Figura 2 mostra a configuração de como a peça de aço fica imersa no campo da bobina. Quanto a Figura 3, demonstra o resultado da indução eletromagnética quando uma liga metálica é submetida ao campo magnético variável, fazendo uso de alta frequência de oscilações na corrente elétrica para aquecer materiais que são bons condutores elétricos, e ligas/aço ferromagnéticos. Uma vez que não ocorre o contato, o processo de aquecimento não deixa contaminantes no material aquecido e também muito eficiente devido ao calor gerado dentro da peça e/ou corpo de prova. Isso o distingue de outros métodos de aquecimento (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2001).

Figura 2. Representação da bobina com o cilindro de aço carbono do reator.



Fonte: Rudnev et al (2003).

Figura 3. Liga metálica incandescente causada pela indução.



Fonte: Rudnev et al (2003).

3.3 Indução eletromagnética

Em 1820, foi descoberto por Hans Christian, físico dinamarquês, que cargas elétricas se movimentando originavam um campo magnético. A comprovação teórica desses estudos levou vários cientistas a acreditar que a forma contrária também deveria ocorrer isto, a variação do campo magnético deveria gerar uma corrente elétrica (ROSA, 2012).

A comprovação dessa teoria se deu em 1831, por Michael Faraday, físico e químico de nacionalidade inglesa. Faraday iniciou as pesquisas que posteriormente levaram a lei de Faraday. Com alguns experimentos iniciais, um deles, envolvendo fios de cobre em pedaços de madeira com galvanômetro inserido no circuito, ele constatou durante o primeiro experimento que, ao aplicar uma fonte de energia (bateria) de forma estacionária, a passagem da corrente elétrica em um condutor produzia um campo magnético e a variação de fluxo do campo magnético em um condutor produzia uma corrente elétrica no sentido oposto do fluxo do campo.

Verificou-se que a indução de corrente dependia apenas do movimento relativo entre o ímã e a bobina, o qual produzia a variação do campo magnético que atravessava a bobina. Esse fenômeno passou a ser chamado nas literaturas como indução eletromagnética e foi descrito teoricamente e matematicamente pela Lei de Faraday de acordo com a Equação (1) (DIAS, MARTINS, 2004).

$$\mathcal{E} = \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

Sendo:

$d\theta$: Variação de fluxo magnético (Tesla * metro quadrado).

dt : Intervalo de Tempo (segundos).

\mathcal{E} : Força eletromotriz induzida (Volts).

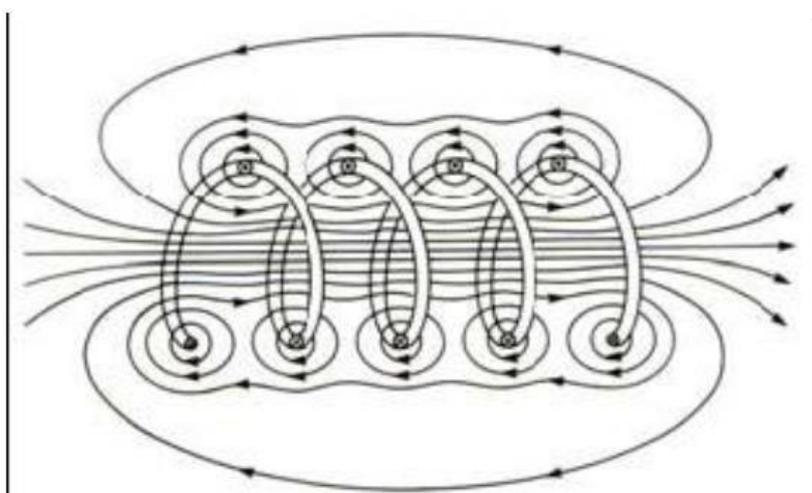
3.4 Sistema de aquecimento por indução

O sistema básico de aquecimento por indução consiste de um circuito eletrônico, uma bobina indutora de campo magnético variável, de um reator e uma fonte de alimentação em corrente alternada (AC).

O conceito básico pode ser compreendido tendo em vista a relação entre a bobina e o núcleo do reator, a fonte de potência (corrente e tensão), a frequência e a forma geométrica da bobina observada na Figura 2. Através destes elementos é possível estimar quais os efeitos elétricos e térmicos que serão induzidos no núcleo do reator através da bobina de indução (SEMIATIN e ZINN, 1988).

O aquecimento por indução coloca em evidência três princípios: a transferência de energia da bobina através do campo magnético para o reator, a transformação da energia elétrica para energia térmica e o calor gerado e transmitido para o núcleo por condução térmica. Neste sistema a bobina de indução e o corpo de prova funcionam como o primário e o secundário de um transformador elétrico, ou seja, durante a variação de um campo eletromagnético o indutor funciona como o primário gerando o campo magnético e o corpo de prova como o secundário gerando uma corrente induzida. Quando uma fonte de potência gera uma corrente alternada (AC), a mesma gera um campo magnético que fica ao redor de cada espira e em toda a bobina como mostra a Figura 4.

Figura 4. Campo magnético induzido associado a uma bobina onde circula uma corrente alternada.



Fonte: SEMIATIN E ZINN (1988).

De acordo com as propriedades físicas do material que será usado no reator, (núcleo), que será aço carbono, constituindo a resistência elétrica, a corrente induzida ou corrente de Foucault provoca uma queda de tensão descrita pela lei de Ohm:

$$V = R * I \quad (2)$$

Em que V é a tensão, R é a resistência elétrica e I é a corrente induzida pela bobina. A queda de tensão está associada à perda por efeito Joule que resulta no aquecimento do metal segundo a expressão.

$$P = I^2 * R \quad (3)$$

Onde P é a potência dissipada, I é a corrente e R a resistência elétrica do metal (SVOBODA, 2012).

A área compreendida entre o diâmetro interno da bobina e o diâmetro externo do material é o local de maior concentração do campo magnético induzido. Na superfície do metal as correntes induzidas são mais fortes e decrescem em direção ao centro. Quando este fenômeno acontece na superfície do material, chamam-no de efeito de pele, como pode ser observado na Figura 5. É justamente esse tipo de fenômeno que motiva a ideia de usar um sistema de indução eletromagnética para realizar pirólise.

O efeito de pele está diretamente relacionado com a frequência do campo elétrico, com a resistividade elétrica e com a permeabilidade magnética da peça metálica, e é traduzido pela Equação (4) (SEMIATIN e ZINN, 1988).

$$p = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu^{\circ} \cdot \mu m}} \quad (4)$$

Sendo:

p: Efeito pele (profundidade de penetração)

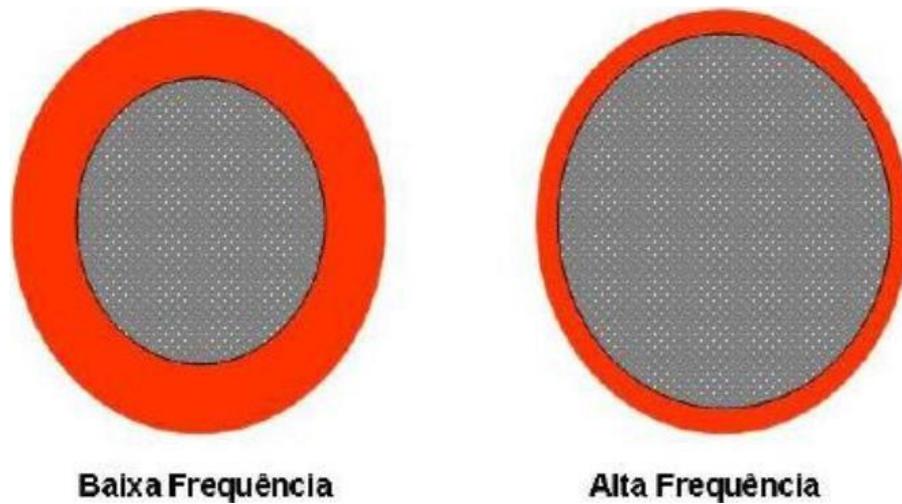
ρ : Resistência elétrica

f: Frequência

μ° : Permeabilidade magnética

μm : Permeabilidade magnética do material

Figura 5. Efeito de Pele.



Fonte: Inductoheat (2003).

Quando a superfície do material metálico está imersa no campo magnético variável a taxa de aquecimento varia de acordo com a distância radial e também é função do material.

Para que se tenha uma melhor eficiência nas taxas de aquecimento, é preferível ligas metálicas ferromagnéticas e o volume da peça metálica que ficará imersa no campo magnético, gerado na bobina, não pode ultrapassar um terço do volume interno da bobina, pois pode causar uma sobrecarga e a potência exigida pode ultrapassar a potência máxima da placa que é de 1000 *W*.

4. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

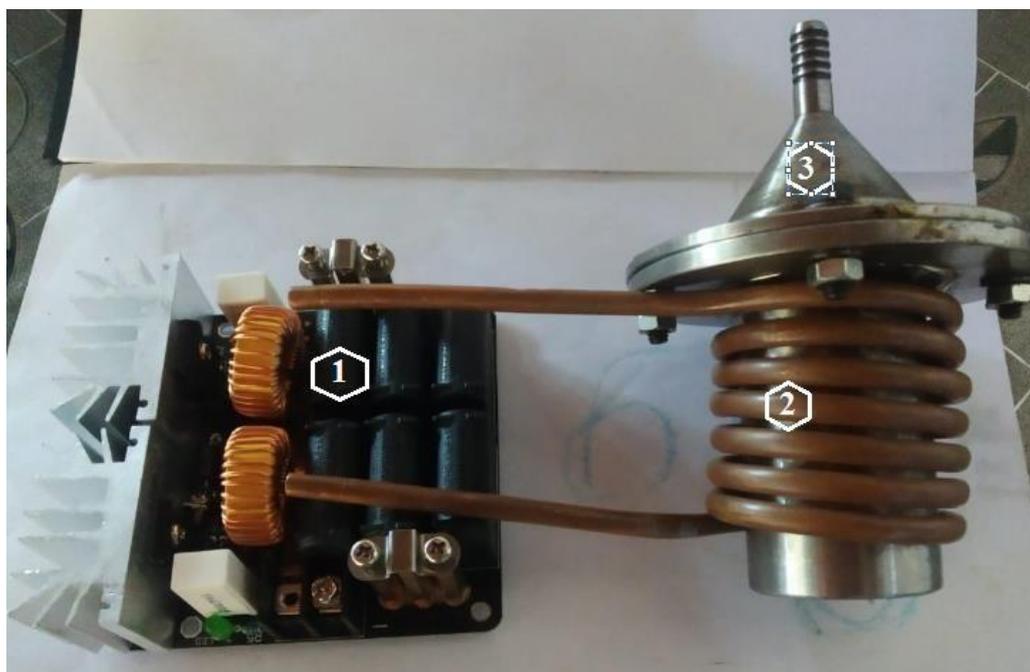
4.1 Reator por indução eletromagnética

O reator consiste em um sistema por indução, Figura 6, usando fonte de alimentação AC/DC (corrente alternada/contínua) de baixa tensão (12 V - 48 V) na entrada da placa, uma bobina e um cilindro de metal (reator):

- Corrente máxima 20 A;
- Potência máxima 1000 W;
- Diâmetro interno da bobina: aproximadamente 40 mm;
- Altura da bobina: aproximadamente 50 mm;
- Dois transistores IRFP26 ON; Seis capacitores do tipo MKP de 0,33 μF (+-) 5%.

Quanto maior a tensão, maior a corrente elétrica consumida, conseqüentemente o calor dissipado através do aquecimento pela bobina também será maior. Para evitar o superaquecimento na bobina é necessário um sistema de troca térmica.

Figura 6. Sistema pirolítico por indução.



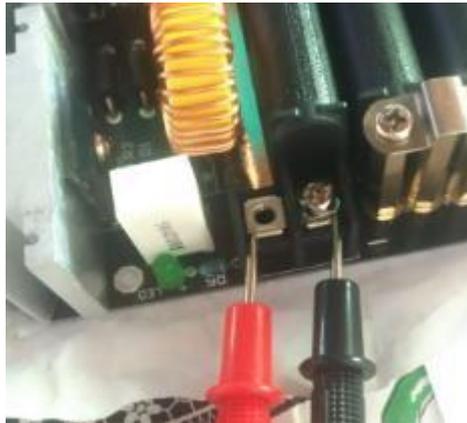
Fonte: Autor (2020).

- 1- Placa do circuito;
- 2- Bobina;
- 3- Reator em aço carbono SAE 1045;

4.1.1 Funcionamento do reator

Através dos princípios físicos já discutidos, o funcionamento do equipamento é relativamente simples. O sistema não possui chave ON/OFF, pois é ligado diretamente como mostrado na Figura 7.

Figura 7. Ligação direta da placa a partir da fonte



Fonte: Autor (2020).

Após a fonte alimentar a placa, ajusta-se a tensão de trabalho desejada, e as correntes geram o campo magnético variável através da bobina. Quando os fluxos de corrente elétrica estiverem ativados na bobina, o campo magnético variável gerado aquecerá o reator como mostra na Figura 8.

Figura 8. Reator em aço carbono SAE 1045.



Fonte: Autor (2020).

4.1.2 Limitações do projeto

Durante a execução dos testes com o sistema, não foi possível utilizar uma fonte adequada para alimentar o circuito elétrico de forma que se permitisse seu uso prolongado e a carga de potência necessária, conforme citado anteriormente, a fonte precisa ser ajustável para a tensão e corrente e os cabos elétricos precisam suportar altas correntes em baixas tensões, o que implica evitar superaquecimento, necessário para a realização da pirólise. Um exemplo de uma fonte adequada está representado na Figura 9.

Figura 9. Fonte assimétrica ajustável.



Fonte: <https://br.banggood.com> (2020).

A fonte usada para fazer os testes foi bem limitada. Devido à dificuldade de recursos da universidade foi utilizada uma fonte comum que até possui a tensão ajustável entre (12 V – 24 V), porém com a corrente elétrica constante, não sendo possível a sua modulação. Os cabos elétricos da fonte também não resistem muito tempo as correntes elétricas e superaquecem, causando uma limitação de operação no sistema e impossibilitando o uso do reator (Figura 8, página 16). Com essa fonte não foi possível realizar a pirólise rápida, porém foi possível executar os testes de aquecimento em hastes metálicas, Figura 10, com propriedades magnéticas semelhantes as do reator, além de ter sido possível efetuar os testes para determinar a eficiência energética do trabalho.

O sistema obteve uma resposta satisfatória quanto ao tipo de material utilizado e dimensão adequada.

Figura 10. Haste metálica aço inox 316.



Fonte: Autor (2020).

4.1.3 Continuidade do projeto

Os recursos limitados foram os fatores que mais restringiram o objetivo principal do trabalho, para apenas a demonstração da eficiência energética do reator e as comparações com o modelo por resistência elétrica. Contudo, os valores gastos com o reator proposto e o custo para finalizá-lo, ainda assim, são inferiores se comparados com o custo e manutenção dos reatores por resistência elétrica utilizados em laboratórios.

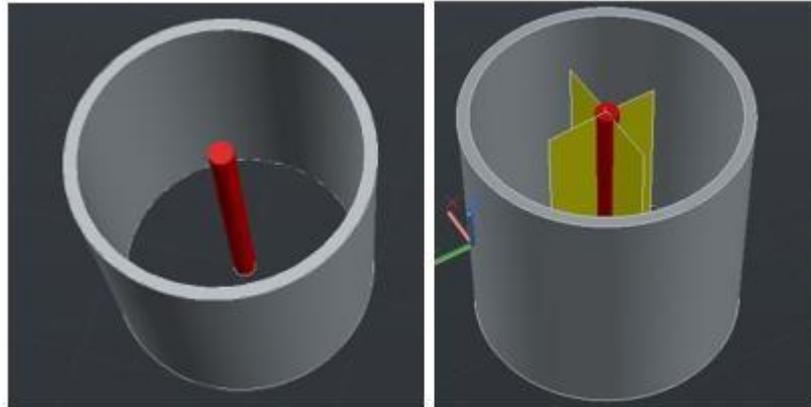
Os experimentos com pirólise deverão fazer parte de outra etapa desse trabalho, possivelmente como tema de uma dissertação de mestrado ou publicação de artigo.

Existem ajustes que serão necessários para viabilizar a realização da pirólise rápida com biomassa. Com mais importância à utilização de uma fonte assimétrica de bancada e com objetivos mais ambiciosos, o reator que será usado dentro da bobina precisará ser substituído por um novo reator com carcaça em cerâmica e uma haste metálica em seu centro, onde receberá a energia para o aquecimento. Outra ideia de ajuste seria a redução do diâmetro do reator, porém essa modificação reduziria a capacidade de processamento de biomassa, pois teria um volume menor e não aproveitaríamos bem a potência disponível do equipamento.

O modelo proposto está idealizado na Figura 11. A Figura 11 (a) propõe apenas uma haste que sofrerá o aquecimento, a Figura 11 (b) propõe a adição de superfícies estendidas, a fim de distribuir melhor a energia. Ambas serão consideradas no caso da continuidade do trabalho. De qualquer maneira há muitas possibilidades para novos estudos que o

equipamento permitirá realizar quando estiver efetivamente concluído.

Figura 11. Projeto de reator em cerâmica com uma haste metálica no centro (a) reator com aletas (b).



(a)

(b)

Fonte: Autor (2020).

5. METODOLOGIA

5.1 Construção da placa (Circuito elétrico)

A execução desse trabalho se deu através da confecção de um circuito eletrônico indutivo para aquecer um reator em aço carbono e realizar pirólise rápida.

A placa foi projetada e desenvolvida utilizando a plataforma online **EasyEDA**, usada para criação e edição de PCB's, **Printed Circuit Board**, e compra de componentes eletrônicos.

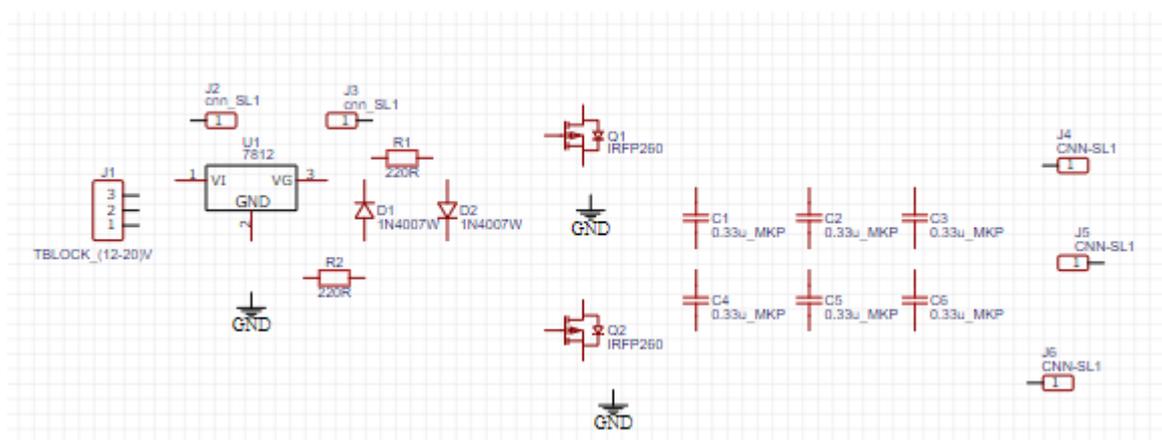
As etapas de elaboração da placa estão disponíveis nas Figuras 12, 13, 14, 15. O circuito foi idealizado baseado em equipamentos de tratamento térmico em ligas de aços.

Na primeira etapa, Figura 12, os componentes eletrônicos foram colocados de acordo com suas especificações para gerar o arranjo das malhas.

A Figura 13 mostra a ligação das malhas entre os componentes eletrônicos, e a figura 13 mostra o layout da PCB, além das posições dos componentes distribuídos e organizados de acordo com a mínima área de placa necessária para executar o roteamento das trilhas que serão estampadas na impressão da placa.

É preciso considerar trilhas largas devido às altas correntes elétricas do sistema. A Figura 15 mostra a placa finalizada e pronta para impressão. Pela plataforma online **EasyEDA** é possível inserir o comando para autorizar a produção e entrega da placa pronta, conforme foi realizado nesse trabalho.

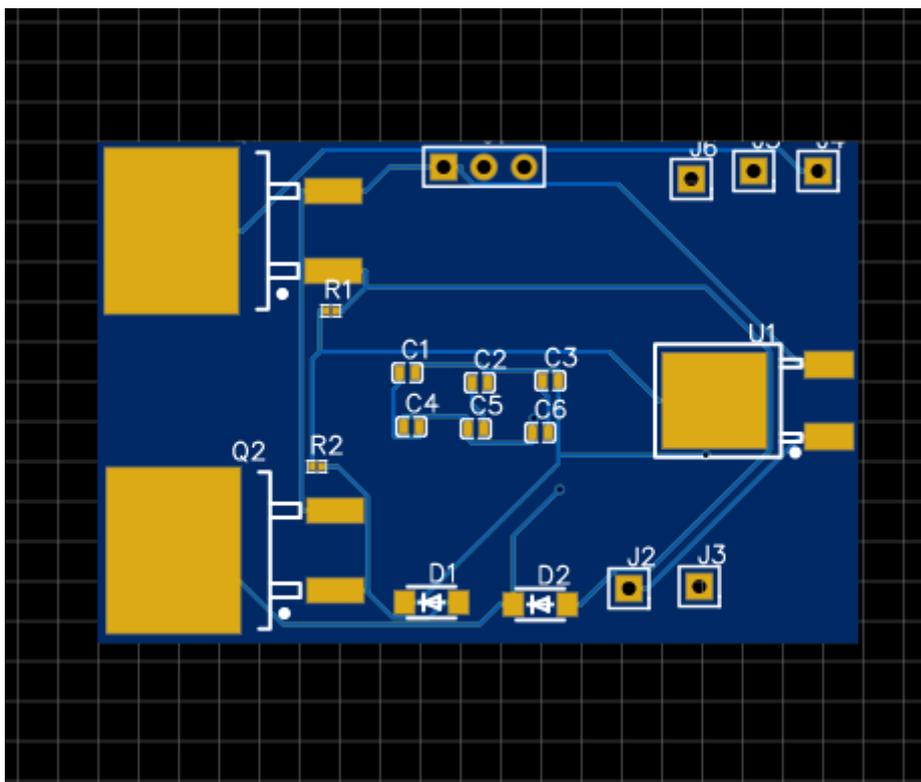
Figura 12. Primeira etapa: disposição dos componentes eletrônicos.



Fonte: Autor (2020).

Figura 13. Segunda etapa: ligação das malhas.

Figura 15. Quarta etapa: impressão (PCB).



Fonte: Autor (2020).

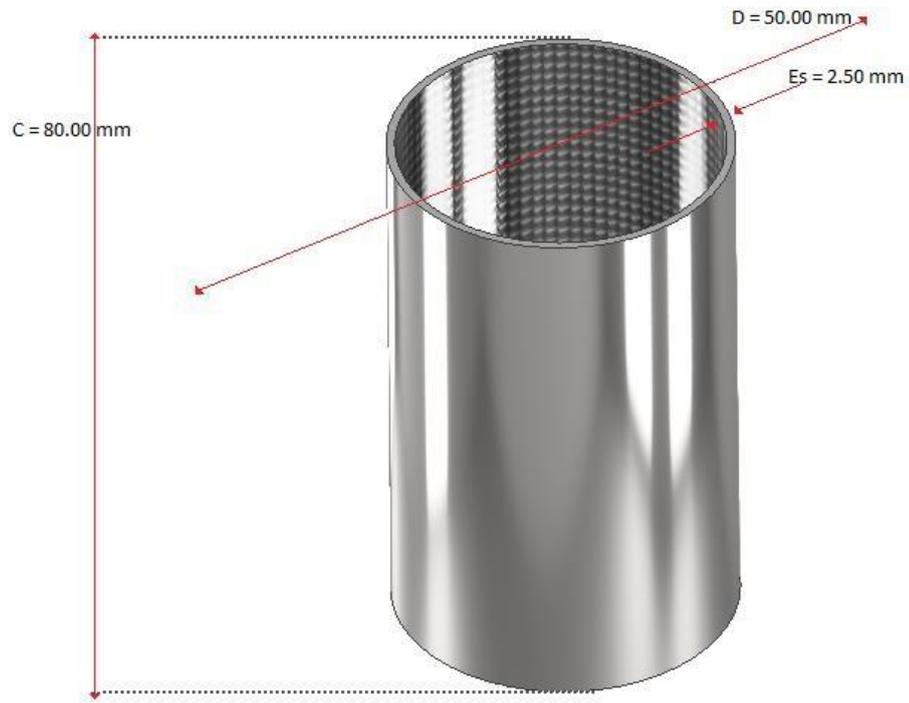
5.1.2 Construção do reator em aço SAE 1045

O reator foi projetado levando em consideração as dimensões da geometria da bobina, conforme a Figura 16 e também considerando a potência gerada pelo sistema.

Depois do projeto pronto, Figura 17, foi encaminhado para a empresa responsável pela confecção de peças e equipamentos mecânicos GLOBALMAC, localizada no município de Marechal Deodoro em Alagoas.

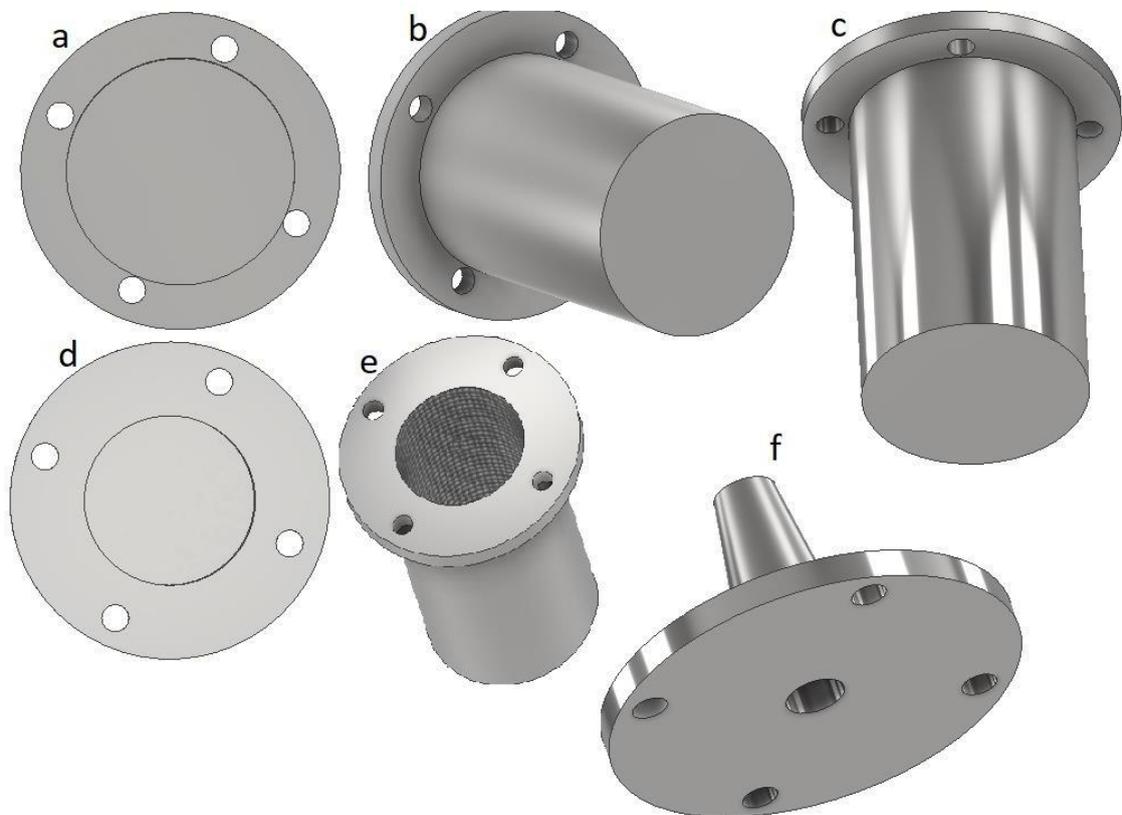
O material utilizado na confecção do reator foi o aço carbono SAE1045, escolhido devido suas propriedades magnéticas satisfatórias, baixa temperabilidade, baixo custo e de fácil usinagem, porém não é quimicamente inerte. O SAE1045 possui composição química de Carbono (0,43% - 0,50%), Silício (0,15% - 0,35%), Manganês (0,30% - 0,60%), Fósforo (0,03% máx) e Enxofre (0,05% máx.).

Figura 16. Dimensões do reator.



Fonte: Autor (2020).

Figura 17. Projeto do reator em aço carbono.



Fonte: Autor (2020).

5.1.3 Funcionamento do sistema por indução e testes

Foi utilizada uma fonte AC/DC com regulagem de tensão elétricas de 12 V, 16 V e 20 V, com a corrente constante de 4.5 A, porém essa fonte não suportou a potência do sistema quando utilizado o reator e os cabos elétricos da fonte superaqueceram. Por esse motivo a opção foi testar com uma haste de metal cilíndrica, de diâmetro de quinze milímetros no lugar do reator.

Foram colocados 9 g de água dentro da haste cilíndrica de metal que foi aquecida nas tensões citadas. O objetivo desse experimento foi determinar as taxas de aquecimento considerando que em condições normais de temperatura e pressão, a água entra em ebulição em 100 °C.

O critério das temperaturas finais para o reator por indução foi determinado de acordo com o limite de tempo dos cabos da fonte; sempre que os cabos superaqueciam, mesmo com uma exigência menor da fonte, foi feito o desligamento até que a fonte retornasse para a temperatura ideal.

5.2 Sistema por resistência elétrica

Com o objetivo de comparar a eficiência do reator por indução, foi utilizado o reator por resistência elétrica do Laboratório de Sistemas de Separação e Otimização de Processos (LASSOP) da Universidade Federal de Alagoas, Figura 18, para realização de três duplicatas de pirólises.

A primeira duplicata foi realizada com temperatura final de 500 °C e taxa de aquecimento de 25 °C/min, a segunda com temperatura de 700 °C e taxa de 25 °C/min e a terceira com temperatura final de 450 °C e taxa de 10 °C/min. Durante as pirólises foram coletados dados de consumo de corrente elétrica sob tensão constante de 220 V da rede elétrica.

Foi utilizado um multímetro, figura 19, no circuito do reator por resistência elétrica para medir o consumo da corrente elétrica sob tensão constante de 220 V da rede. Com os dados colhidos foi possível demonstrar e comparar a eficiência energética de ambos os sistemas.

Figura 18. Reator pirolítico por resistência elétrica.



Fonte: Autor (2020).

Figura 19. Medição com multímetro “ligado” na linha de alimentação do reator.



Fonte: Autor (2020).

As medições foram realizadas em conjunto com práticas que já estavam agendadas e foi aproveitada a disponibilidade dessas práticas.

Não foi necessário considerar as informações dos resultados desses experimentos porque seriam informações pertinentes aos estudos de termogravimetria. Logo o foco dessas medições são as correntes elétricas em diferentes taxas de aquecimentos com diferentes temperaturas finais dos processos, através desses dados foi possível calcular o consumo energético do equipamento considerando apenas o reator e não o sistema de condensação.

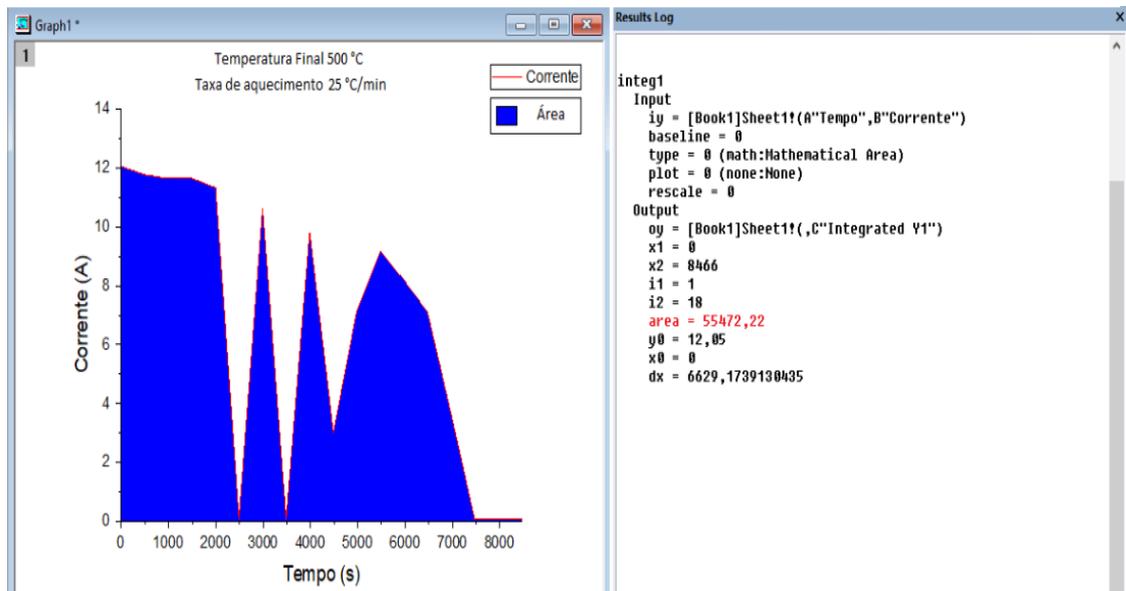
6. RESULTADOS

6.1 Reator I (Resistência elétrica)

Os resultados dos experimentos com o primeiro reator estão apresentados nas tabelas e gráficos 20, 21 e 22.

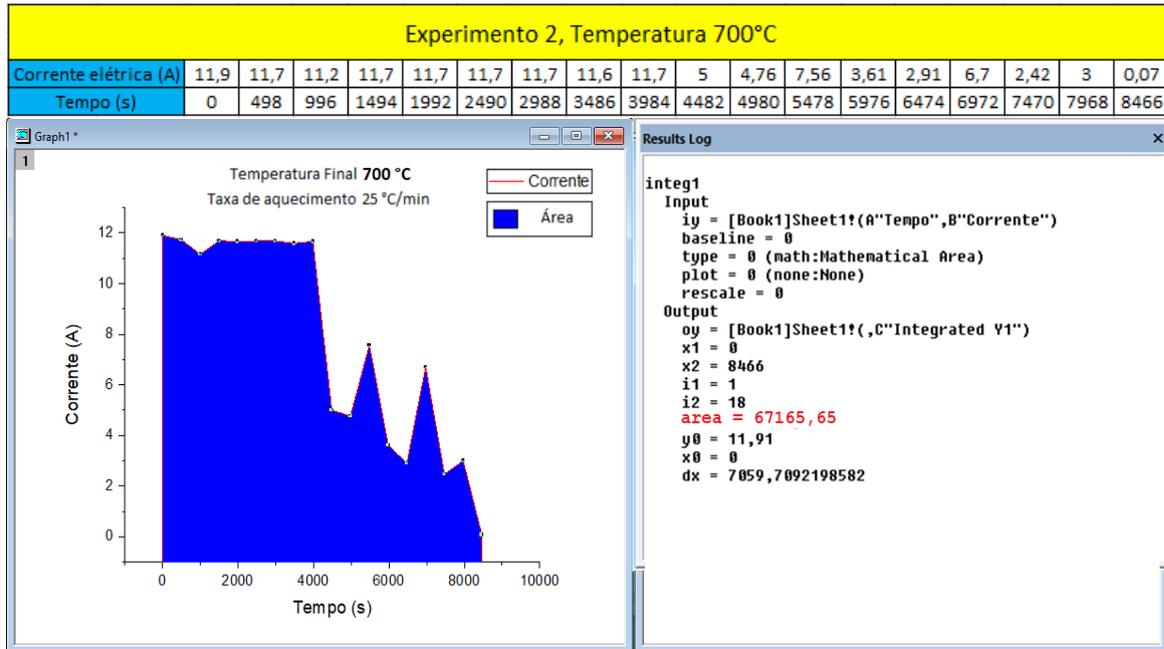
Figura 20: Tabela 1, Taxa de aquecimento (25 °C/min).

Experimento 1, Temperatura 500°C																			
Corrente elétrica (A)	12,1	11,8	11,6	11,7	11,3	0,07	10,6	0,07	9,81	2,99	7,14	9,16	8,19	7,1	3,65	0,07	0,07	0,07	
Tempo (s)	0	498	996	1494	1992	2490	2988	3486	3984	4482	4980	5478	5976	6474	6972	7470	7968	8466	



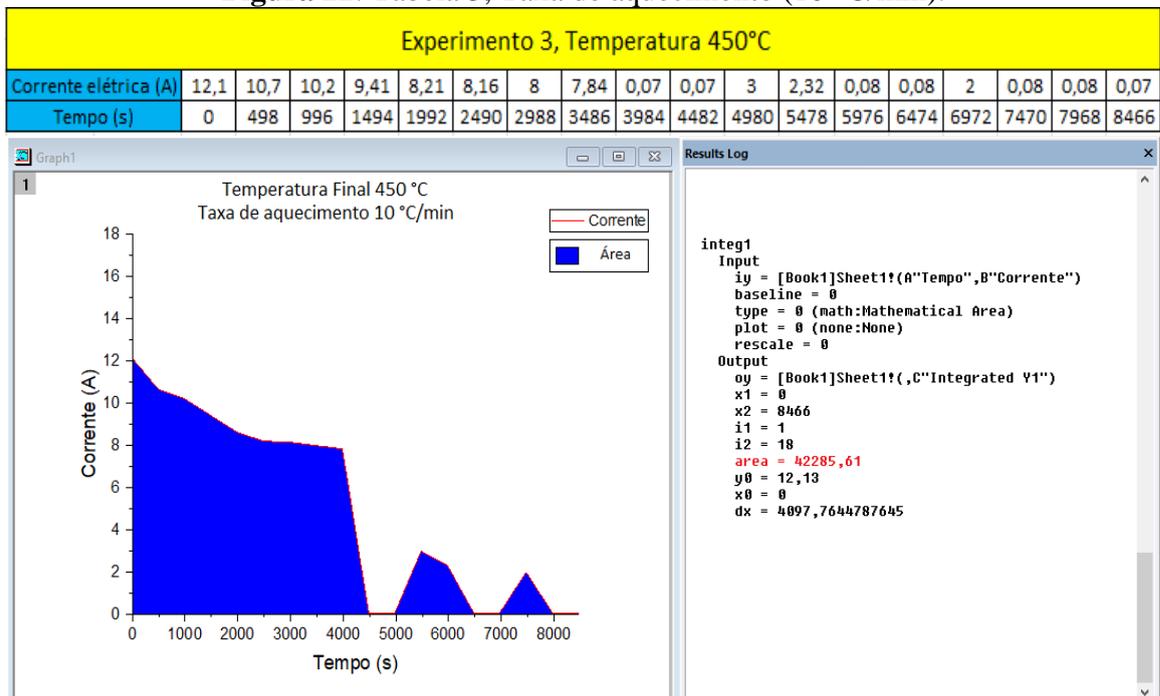
Fonte: Autor (2020).

Figura 21: Tabela 2, Taxa de aquecimento (25 °C/min).



Fonte: Autor (2020).

Figura 22: Tabela 3, Taxa de aquecimento (10 °C/min).



Fonte: Autor (2020).

Em cada experimento foram utilizadas biomassas diferentes, tanto em relação ao formato dos grãos, bem como em quantidade. Independente da biomassa utilizada ou da quantidade, o consumo de corrente elétrica para ambos os reatores será influenciado apenas pelas taxa de aquecimento aplicada e temperatura final desejada. Essas especificações ficam a critério exclusivo dos estudos de termogravimetria que se deseja, mas o intuito é aplicar os conceitos da indução eletromagnética para um equipamento que possa desempenhar uma função superior ao reator por resistência elétrica, devido a seu baixo custo de produção, manutenção e manuseio, pretendendo obter uma ferramenta que proporcione mais eficiência nos estudos com pirólise.

A área dos gráficos representa a quantidade total de corrente que foi consumida ao longo da pirólise. O objetivo é saber qual foi a energia consumida em cada pirólise e para calcular esse consumo e determinar a energia consumida no processo, usamos a equação (6). Porém para calcular a energia é preciso antes calcular a potência consumida tomando o produto da tensão com a corrente total conforme a equação (5).

$$P_c = U * I \quad (5)$$

O consumo da corrente não é constante durante o processo com o reator por resistência elétrica, então se faz necessário determinar a integral das curvas nos gráficos gerados com os dados que estão nas tabelas 1, 2 e 3, depois determinar a potência consumida para calcular a energia usando a equação (6) compreendida na equação (7).

$$E_c = P_c * T \quad (6)$$

Para o primeiro experimento chegamos aos seguintes resultados: a área total que representa o valor da corrente consumida é igual a **55472,22 A.s**, a tensão da rede é constante em **220 v**, logo fazemos o produto da área com a tensão e obtemos o valor do consumo energético.

$$E_c = \text{Área} * \text{Tensão} \quad (7)$$

$$E_{c1} = 55472,22 \text{ A.s} * 220 \text{ v} \Rightarrow \mathbf{12203,89 \text{ kJ}} \Rightarrow \mathbf{3,34 \text{ KWh}} \quad (8)$$

O segundo experimento tem área total igual a 67165,65 A. s logo:

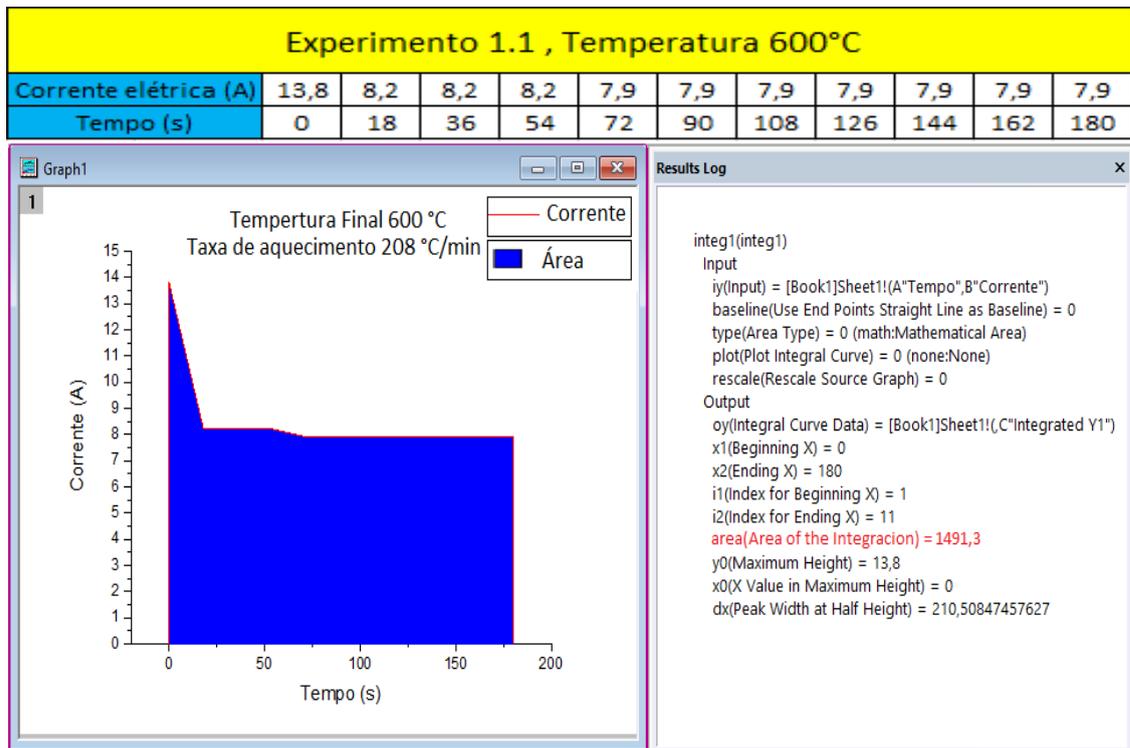
$$Ec2 = 67165,65 \text{ A. s} * 220 \text{ v} \Rightarrow 14776,44 \text{ kJ} \Rightarrow 4,11 \text{ KWh} \quad (9)$$

O terceiro experimento tem área total igual a 42285,61 A. s logo:

$$Ec3 = 42285,61 \text{ A. s} * 220 \text{ v} \Rightarrow 9302,83 \text{ kJ} \Rightarrow 2,58 \text{ KWh} \quad (10)$$

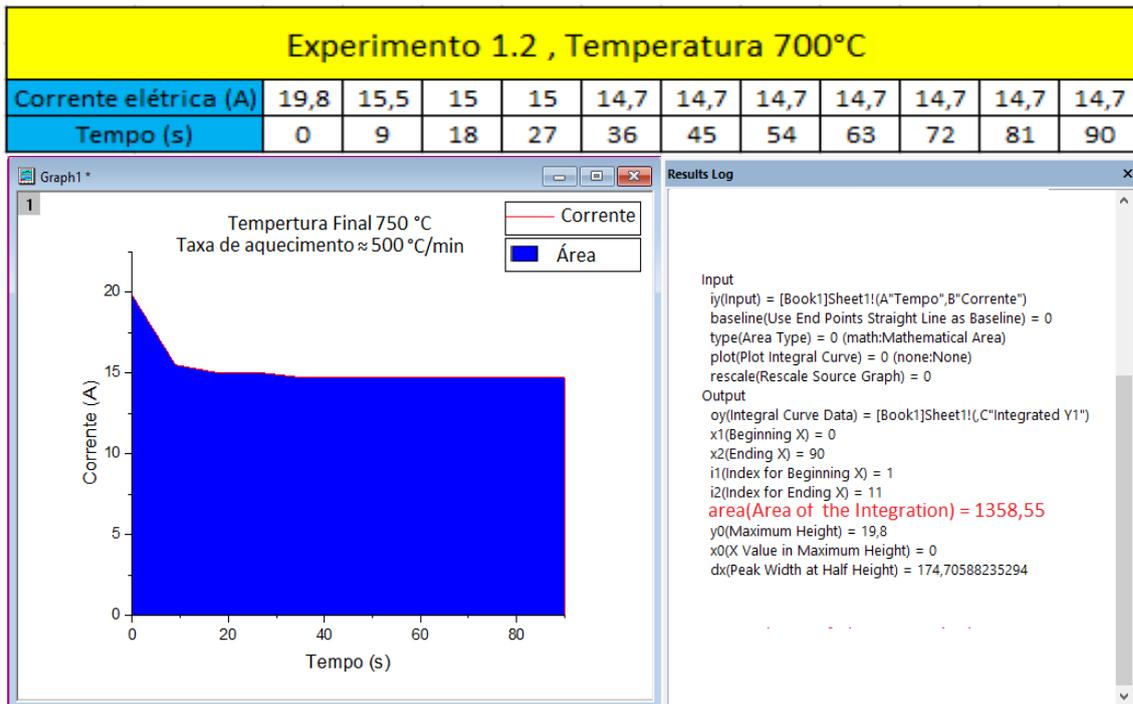
6.2 Reatore II (Indução)

Figura 23: Tabela 4, Taxa de aquecimento (208 °C/min).



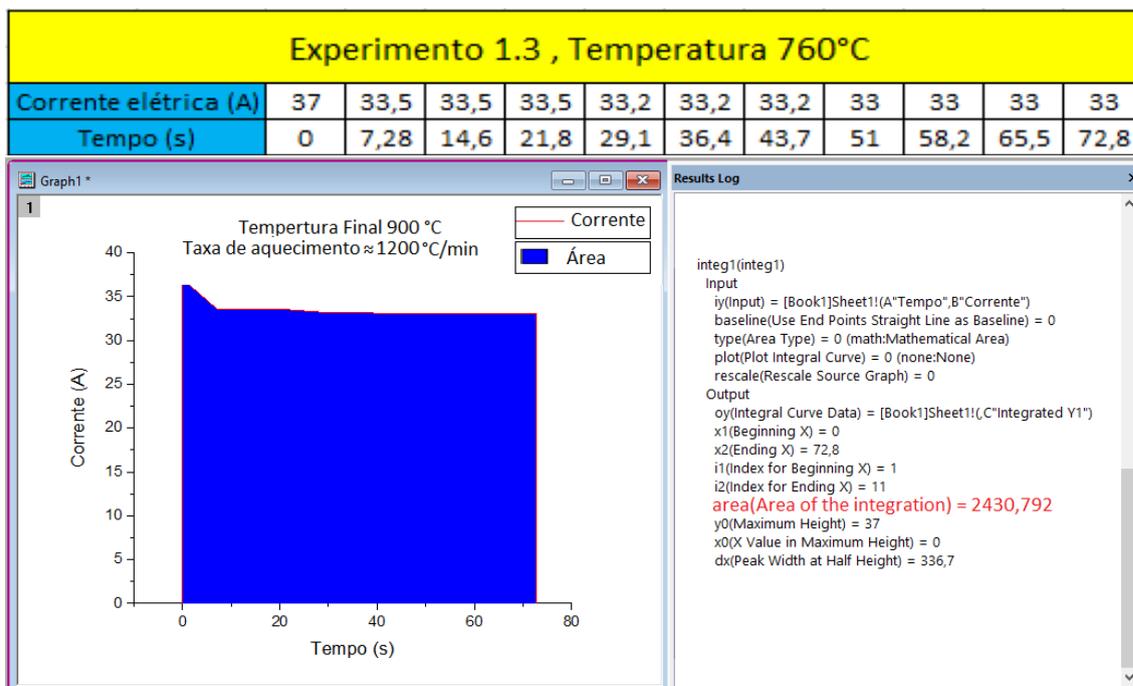
Fonte: Autor (2020).

Figura 24: Tabela 5, Taxa de aquecimento (333 °C/min).



Fonte: Autor (2020).

Figura 25: Tabela 6, Taxa de aquecimento (1200 °C/min).



Fonte: Autor (2020).

A proposta do reator por indução eletromagnética é proporcionar altas taxas de aquecimento para a realização da pirólise rápida, logo fica restrito aos estudos de termogravimetria a determinação das temperaturas finais da pirólise e também o tempo necessário do processo, mas é preciso levar em consideração que após o reator atingir a temperatura desejada o consumo de energia se torna desprezível.

Os resultados das tabelas; 4, 5 e 6 são referentes às tensões de 12 *v*, 16 *v* e 20 *v* respectivamente. No teste (1) e usando a mesma equação (7), o resultado do consumo de corrente total é de **1491,3 A.s** logo:

$$Ec = \text{Área} * \text{Tensão} \quad (7)$$

$$Ec1.1 = 1491,3 \text{ A.s} * 12 \text{ v} \Rightarrow \mathbf{17,90 \text{ kJ}} \Rightarrow \mathbf{0,005 \text{ KWh}} \quad (11)$$

O segundo experimento tem área total igual a **1358,55 A.s** logo:

$$Ec1.2 = 1358,55 \text{ A.s} * 16 \text{ v} \Rightarrow \mathbf{21,74 \text{ kJ}} \Rightarrow \mathbf{0,006 \text{ KWh}} \quad (12)$$

O terceiro experimento tem área total igual a **2430,79 A.s** logo:

$$Ec1.3 = 2430,79 \text{ A.s} * 20 \text{ v} \Rightarrow \mathbf{48,62 \text{ kJ}} \Rightarrow \mathbf{0,014 \text{ KWh}} \quad (13)$$

Aparentemente o baixo consumo energético do segundo reator, se deve ao menor tempo de processo que foi usado, entretanto, como foi dito, após o sistema atingir a temperatura desejada, o consumo de energia torna-se desprezível em ambos os reatores, porém no segundo reator a alta taxa de aquecimento permite que a pirólise atinja sua temperatura final em um menor tempo. Mesmo que seja necessário realizar um experimento com taxas menores de aquecimento, o reator por indução teria sua tensão ajustada de acordo com a necessidade do experimento com o controle correto de tensão na fonte do reator. As altas frequências permite que uma menor potência seja consumida respeitando a lei da conservação de energia, mas proporcionando alta performance e mesmo do ponto de vista da transferência de energia o caminho do fluxo energético é menor devido ao campo magnético induzir diretamente na peça metálica.

Comparado com o primeiro reator no que se diz respeito ainda ao curto tempo de processo que as altas taxas de aquecimento do segundo reator proporcionam em relação ao

primeiro, outra informação importante é que o segundo reator trabalha com altas frequências de correntes enquanto o primeiro trabalha com a frequência limitada pela rede de 60 Hz. Por esse motivo é que se consegue essa eficiência superior usando um modelo por indução para fins de estudos e em escala laboratorial.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pirólise ainda é um tema que pode ser muito explorado, e diversas pesquisas em desenvolvimento nessa área buscam basicamente o mesmo objetivo, que é a transformação da biomassa em produtos com maior valor agregado.

O reator por indução se mostrou como uma ferramenta promissora que pode contribuir muito com os estudos de pirólise rápida. Ainda há muito o que se explorar no que se diz respeito a suas configurações, quanto ao tipo de leito, o tipo de material da carcaça do reator e o tipo de estudo termogravimétrico que se pretende executar com essa ferramenta.

É importante destacar que esse equipamento, por ter um baixo custo de confecção, baixo custo de manutenção e uma eficiência energética superior aos modelos que utilizam resistência elétrica, torna-se notavelmente uma ferramenta mais atraente e ainda pode ser melhorado por meio da adição de instrumentos que permitam um controle mais adequado e preciso de seus parâmetros e modos de funcionamento.

Apesar do equipamento ainda precisar de ajustes foi possível realizar testes que permitiram determinar sua eficiência energética e o desempenho com baixas tensões elétricas. Contudo os benefícios que podem ser extraídos desse modelo de reator são extensos quando se pensa nas possibilidades que podem ser exploradas nas pesquisas com pirólise.

Portanto, é de interesse a continuidade do projeto desenvolvido buscando o aperfeiçoamento em novos estudos.

8. REFERÊNCIAS

AIRES, R, D; LOPES, T, A; BARROS, R, M. **Pirólise**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás (CEFET-GO) Curso de Tecnologia em Química Agro-Industrial. Disponível em: <http://observatorioambiental.iff.edu.br/publicacoes/publicacoes-cientificas/pirolise.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2020.

DIAS, V. S.; MARTINS, R. A. Michael Faraday: **O caminho da livraria à descoberta da indução eletromagnética**. Ciência & Educação (Bauru). Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências, campus de Bauru., v. 10, n. 3, p. 517-530, 2004. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/26460>. Acesso em: 25 de fev. 2020.

HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J. **Fundamentos de física**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2001 vol 3.

INDUCTOHEAT, **Basics of induction** 2003. Disponível em: <https://inductoheat.com/inductoheat-induction-heating-applications/induction-heat-treating-technologies/>. Acesso em: 21 de fev. 2020.

EASYEDA Project. **Versão Completa**. [S. l.]: Microsoft Corporation, 1995. 1 CD.

RESENDE, F. **Tópicos em economia aplicada pirólise**. School of Environmental and Forest Sciences (SFES) University of Washington. Disponível em: https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:-EFpaQYXem8J:https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3613872/mod_folder/content/0/3%2520Pirólise.pdf%3Fforcedownload%3D1+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br. Acesso em: 21 de fev. 2020.

ROSA, C. A. P. **História da ciência: o pensamento científico e a ciência no século XIX** / Carlos Augusto de Proença. — 2. ed. — Brasília: FUNAG, 2012.

RUDNEV, V. L; LOVELESS, D. L; COOK, R. L. e BLACK. M. R. **Handbook of induction Heating**. New York: Editora Mareei Dekker.2003. p 11 - 136. (A)

SEMIATIN, S.L. ZINN, S. **Elements of Induction Heating Design**, Control and Applications 1988.

SVOBODA, J. M. **Princípios de fusão por indução**, a sociedade dos fundidores americanos instituto de metais fundidos, 2012.

VAZ, JUNIOR. S. **Biorrefinarias: Cenários e perspectivas**. Brasília: Athalaia, 2011. Disponível em: http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/10778/EMBRAPA_Biorrefinarias-Cen%20E1rios-e-Perspectivas.pdf?sequence=1. Acesso em: 12 de fev. 2020.

MICROSOFT Project for Windows 95. Versão 4.1. [S. l.]: Microsoft Corporation, 1995. 1 CD.