

**MODELAGEM EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE UM RECEPTOR DE
CONCENTRADOR SOLAR PARA SECAGEM DO BAGAÇO DE CANA-DE-
AÇÚCAR**

FERNANDA MEDEIROS E SILVA – 19/0138734

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**MODELAGEM EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE UM RECEPTOR DE
CONCENTRADOR SOLAR PARA SECAGEM DO BAGAÇO DE CANA-DE-
AÇÚCAR**

FERNANDA MEDEIROS E SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
APRESENTADO AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

Fernanda Medeiros e Silva, 19/0138734

(Mestranda)

Prof. Gilberto Gomes, D.Sc (UnB)

(Orientador)

Prof. Luciano Mendes Bezerra, PhD (UnB)

(Examinador Interno)

Prof. Wendell Rossine Medeiros de Souza, D.Sc (UFERSA)

(Examinador Externo)

BRASÍLIA – DF

MAIO DE 2023

“Olhar para trás, após uma longa caminhada, pode fazer perder a noção da distância que percorremos. Mas se nos detivermos em nossa imagem, quando iniciamos e ao término, certamente nos lembraremos de quanto nos custou chegar até o ponto final...”

- Guimarães Rosa

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e a Nossa Senhora de Fátima pela força dada em cada obstáculo enfrentado durante a graduação.

Aos meus pais, Maria e Júnior, pelo incentivo e suporte para que esta caminhada fosse o mais confortável possível.

Ao meu marido e companheiro André Philippe, pela compreensão e paciência durante este período.

Aos meus irmãos, Arthur, Rafael, Guilhermina, Aldellyne e Luiz Henrique, e ao meu sobrinho Gabriel, que trazem animação para minha vida.

À minha madrastra, Angela, que por muitas vezes também foi suporte.

A toda minha família, que me ajudou diretamente e indiretamente na minha formação.

Ao meu orientador, DSc Gilberto Gomes, por todo conhecimento e disponibilidade dados a mim. Além de ofertar orientação, demonstrou um lado muito humano e compreensivo, tornando uma inspiração profissional e pessoal.

Ao Leonardo Valadares, pela orientação durante o desenvolvimento tecnológico e experimentos na Embrapa Agroenergia, que no fim tornou-se parte deste trabalho.

Aos amigos que fiz durante o curso que levarei pra vida, Wallas Borges, Rafael Sobral, Tiago Mota, Carolina Lemos, Márcio Fernando, Márcio Avelino, Raí Luz, Mara Monalisa e ao grupo Unidos pelo RU, que contribuíram com apoio emocional para que eu não desistisse no caminho.

A todos que contribuíram para conclusão do mestrado, obrigada!

LISTA DE ABREVIATURAS

CNH – Carbono, nitrogênio e hidrogênio

DNI – Irradiância Normal Direta

ESC – Energia Solar Concentrada

F_L – Fator de Perda de Calor

F_{Ef} – Fator de Eficiência Ótica

MEF – Método dos Elementos Finitos

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

PHB – Polihidroxibutirato

RES1 – Resultado 01, utilizando água em concentrador de 1,0m²

RES2 – Resultado 02, utilizando bagaço em concentrador de 1,0m²

RES3 – Resultado 03, utilizando bagaço em concentrador de 2,5m²

TGA – Termogravimétrico

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Crescimento da Energia Renovável em 10 anos.....	6
Figura 2 - Distribuição da Energia Solar nos Mundo.....	6
Figura 3 - Esquema de concentrador solar	7
Figura 4 - Concentrador cilíndrico parabólico localizado em Aparecida de Goiânia (GO).....	8
Figura 5 - Concentrador solar tipo Fresnel Linear localizado em Florianópolis (SC)	8
Figura 6 - Concentrador solar com foco pontual em usina solar no Arizona, USA.....	8
Figura 7 - Concentrador solar de Torre Central da Usina Ashalim em Israrel.....	9
Figura 8 - Tipos de fogões segundo a classificação de Cuce & Cuce	13
Figura 9 - Fogão Solar Tipo Coletor	14
Figura 10 - Países com maior produção de cana-de-açúcar em 2020	15
Figura 11 - Países de maior produção de cana-de-açúcar na última década	16
Figura 12 - Produção de energia primária no Brasil.....	17
Figura 13 - Concentrador solar de 1m ² e 25 espelhos, montado na Embrapa Agroenergia.	23
Figura 14 - Eixo de rotação do painel	24
Figura 15 - Calibração dos espelhos.....	24
Figura 16 - Suporte para o receptor para encaixe de panela.....	25
Figura 17 - Pino de indicação da posição do sol. (a) Painel corretamente posicionado (b) Desalinhado a posição do sol	25
Figura 18 - Lona para interromper o funcionamento do equipamento.....	26
Figura 19 - Concentrador solar de 2,5 metros quadrado com reator no receptor.....	26
Figura 20 -Reator circular com furos na parte superior.....	27
Figura 21 - Material utilizado na tubulação do reator 01: a) tubos metálicos b) braçadeiras e conector em cruz.....	28
Figura 22 - Reator em funcionamento.....	28

Figura 23 - Tampa do reator 01	29
Figura 24 - Reator 02 com malha espaçada em 1,7 mm a) Fundo da tampa b) área interna....	29
Figura 25 - Reator 02 com malha espaçada em 0,5 mm a) área interna b) Fundo da tampa....	30
Figura 26 - Parte externa do reator 02	30
Figura 27 - Fundo do reator 03	31
Figura 28 - Material para análise microscópica.....	31
Figura 29 - Análise microscópica do exterior do forno.....	32
Figura 30 - Análise microscópica interior e exterior do forno	33
Figura 31 - Primeiro modelo do reator, onde ar comprimido era inserido no tubo de aço	34
Figura 32 - a) Reator 2 e 3, diferenciando pela abertura da malha das telas. b) Abertura segundo reator c) Abertura terceiro reator.	35
Figura 33 - Pesagem do material para experimento: água potável.....	36
Figura 34 - Pesagem de material para experimento: bagaço de cana-de-açúcar	37
Figura 35 - Tubulação de borracha derretendo em experimento.....	38
Figura 36 - Substituição de tubulação de borracha por aço.....	38
Figura 37 - Espelhos desalinhados	39
Figura 38 - Calorímetro com banho de refrigeração	40
Figura 39 – a) Malha de EF cheia; b) Malha ½ simetria de EF	43
Figura 40 - Tampa da panela modelada com 24 furos de 10mm	43
Figura 41 - Modelagem do fundo da panela com 48 furos de 10mm.....	44
Figura 42 - Panela tipo caldeirão modelado com elemento triangular no ABAQUS.....	44
Figura 43 - Aplicação da condição de contorno no modelo com a temperatura obtida em graus celsius	48
Figura 44 - Resultados experimentais para ensaios nos concentradores de 1,0 m ² , em sistema de batelada	49

Figura 45 - Resultados experimentais para ensaios nos concentradores de 2,5 m ² , em sistema de batelada	50
Figura 46 - Resultados experimentais para ensaios nos concentradores de 2,5 m ² , em sistema rotativo.....	50
Figura 47 - Propagação da temperatura no tempo em RES1.....	51
Figura 48 - Ponto de controle para determinação da distribuição de temperatura na superfície do forno, em RES1 a 100°C, utilizando água no recipiente	52
Figura 49 - Propagação da temperatura no tempo em RES2.....	52
Figura 50 - Ponto de controle para determinação da distribuição de temperatura na superfície do forno, em RES2 a 180°C, utilizando bagaço no recipiente	53
Figura 51 - Propagação da temperatura no tempo em RES3.....	53
Figura 52 - Ponto de controle para determinação da distribuição de temperatura na superfície do forno, em RES3 a 365°C, utilizando bagaço no recipiente	54
Figura 53 - Tensões devido a distribuição de temperatura quando aplicado 180°C	54
Figura 54 – Tensões devido a distribuição de temperatura quando aplicado 365 °C.....	55
Figura 55 - Deformação principal devido a distribuição de temperatura de 365°C em vista isométrica	55
Figura 56 - Deformação principal devido a distribuição de temperatura de 100 °C em vista isométrica	56
Figura 57 - Deslocamento máximo devido a distribuição de Temperatura	56
Figura 58 - Análise do interior do recipiente.....	65
Figura 59 - Análise do exterior e interior do recipiente	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Especificações do caldeirão.....	42
Quadro 2 - Detalhe de discretização da malha em MEF	46
Quadro 3 - Detalhe dos elementos utilizados na geração da malha da biblioteca ABAQUS ..	46
Quadro 4 - Resultados obtidos na modelagem numérica	57

LISTA DE SÍMBOLOS

A_t – Área do receptor;

C – Proporção de abertura da área do concentrador em relação a área do receptor;

I_b - Intensidade da radiação difusa;

$(MC_p)'_w$ – Derivada da capacidade de calor da água;

T_a – Temperatura ambiente;

T_w – Temperatura da água na panela;

ΔT - Diferença de temperatura no receptor, que é igual a $T_{w2} - T_{w1}$;

τ - Constante retirada da curva de resfriamento, registrada na queda de temperatura da água, sombreando o concentrador;

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Zonas de DNI	12
Tabela 2 - Análise microscópica do exterior do forno	32
Tabela 3 - Análise microscópica do interior e exterior do forno.....	33
Tabela 4 - Quantidade de experimentos realizados nos concentradores	36
Tabela 5 - Resultados dos ensaios CHN.....	40
Tabela 6 - Experimentos TGA	41

RESUMO

A conversão de energia solar em energia térmica por meio da Energia Solar Concentrada (ESC) se tornou uma alternativa para o processo de secagem de materiais. O bagaço da cana-de-açúcar, resíduo de grande impacto na agroindústria brasileira, que pode ser facilmente utilizado como biomassa, tem seu uso reduzido devido ao seu alto teor de umidade, ou seja, baixa eficiência na produção de energia. Este trabalho objetiva avaliar numericamente um receptor de concentrador solar, a partir das temperaturas extraídas experimentalmente.

A metodologia adotada se baseou em dois tipos de modelagem, a experimental e a numérica. Na etapa experimental foram construídos dois modelos de concentradores, com estrutura metálica e superfície de espelhos planos inclinados que convergem à radiação solar em um foco central, tendo sido ensaiados dois tipos de materiais, a água e o bagaço da cana-de-açúcar, com a finalidade de caracterização dos receptores e aprimoramento do processo da secagem. Na etapa numérica, utilizou-se o Método dos Elementos Finitos, por meio do software *Abaqus*, para determinação do gradiente de temperatura.

Para validar a metodologia adotada, três tipos de receptores foram ensaiados a fim de determinar qual o modelo mais eficiente para o processo de secagem. Para o receptor escolhido foi feita uma análise em estado estacionário e transiente, objetivando encontrar a variação da temperatura no tempo, as tensões térmicas, as deformações e os deslocamentos no receptor.

Por fim, concluiu-se que a radiação atingida no receptor analisado foi um fator preponderante na eficiência necessária à secagem do bagaço, uma vez que se verificou uma distribuição não uniforme das tensões e, conseqüentemente, encontrando fragilidades nas áreas de descontinuidades da estrutura do receptor. Isso resultou em maiores tensões e deformações, localizando os possíveis pontos de falhas de fadiga.

Palavras-chave: Concentrador Solar; Receptor tipo Cilíndrico; Bagaço da Cana-de-açúcar; Gradiente Térmico; Abaqus.

ABSTRAT

The conversion of solar energy into thermal energy through Concentrated Solar Energy (CSE) has become an alternative for the drying process of materials. Sugarcane bagasse, a residue of great impact on the Brazilian agroindustry, that can be easily used as biomass, has its use educed due to its high moisture content, that is, low efficiency in energy production. This work aims to numerically evaluate a solar concentrator receiver, from the temperatures extracted experimentally.

The methodology adopted was based on two types of modeling, experimental and numerical. In the experimental stage, two models of concentrators were built, with a metallic structure and surface of inclined plane mirrors that converge to solar radiation in a central focus, having tested two types of materials, water and sugarcane bagasse, with the purpose of characterizing the receptors and improving the drying process. In the numerical stage, the Finite Element Method was used, using the Abaqus software, to determine the temperature gradient.

To validate the adopted methodology, three types of receivers were tested in order to determine the most efficient model for the drying process. For the chosen receiver, a steady-state and transient analysis was carried out, aiming to find the temperature variation over time, thermal stresses, deformations and displacements in the receiver.

Finally, it was concluded that the radiation reached in the analyzed receiver was a preponderant factor in the efficiency necessary for drying the bagasse, since there was a non-uniform distribution of stresses and, consequently, weaknesses in the areas of discontinuities of the receiver structure . This resulted in greater stresses and deformations, locating possible fatigue failure points.

Keywords: Solar Concentrator; Cylindrical Type Receiver; Sugarcane Bagasse; Temperature Gradient; Abaqus.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	3
1.2 OBJETIVOS.....	4
2 CONCEITOS INICIAIS	5
2.1 ENERGIA SOLAR	5
2.2 CONCENTRADOR SOLAR.....	6
2.2.1 <i>Tipos de concentradores</i>	7
2.2.2 <i>Locais adequados para uso de concentrador</i>	12
2.3 RECEPTOR SOLAR	12
2.4 CANA-DE-AÇÚCAR.....	15
2.4.1 <i>Meios alternativos para destinação do bagaço da cana-de-açúcar</i>	17
2.5 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	18
2.5.1 <i>Abaqus</i>	20
3 MATERIAL E MÉTODO	22
3.1 LOCAL E PROCESSO DO ENSAIO	22
3.2 MATERIAIS	22
3.3 CONCENTRADORES SOLARES	23
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS REATORES	27
4 MODELAGEM EXPERIMENTAL	34
4.1 TESTES DOS CONCENTRADORES.....	34
4.2 METODOLOGIA DOS EXPERIMENTOS COM ÁGUA	36
4.3 METODOLOGIA DOS EXPERIMENTOS COM BAGAÇO	37
5 MODELAGEM NUMÉRICA	42
5.1 MODELAGEM DO CALDEIRÃO	42
5.1.1 <i>Malha de elementos e estados para análise</i>	43
5.1.2 <i>Critério de análise e malha de elementos finitos</i>	44
5.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO DA MODELAGEM	47

6 ANÁLISES E RESULTADOS	49
6.1 ANÁLISES DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	49
6.2 ANÁLISE DA MODELAGEM	51
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	58
7.1 CONCLUSÕES GERAIS	58
7.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS.....	59
7.3 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTURO	60
REFERÊNCIAS	61
APÊNDICE A - ANÁLISE MICROSCÓPICA DE RECIPIENTE	65
APÊNDICE B -REATOR 01	66
APÊNDICE C -REATOR 02 E 03	67
APÊNDICE D - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	68
APÊNDICE E – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CALORIMETRIA E TGA	79
APÊNDICE F – RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA	80

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Bem difundida entre as energias renováveis, a energia solar já é produzida em grande escala pelo mundo, totalizando 40% de todas as energias renováveis (ADELAKUN e OLANIPEKUN, 2019). Utilizadas principalmente para produção de energia elétrica e aquecimento, existem diversas formas de geração de energia, entre elas a concentração de energia solar. A energia solar é definida como a conversão da luz solar em energia elétrica ou energia térmica, podendo ser por meio de células fotovoltaicas, ou indiretamente usando Energia Solar Concentrada (ESC).

A utilização de concentrador solar já vem sendo bastante expandida, utilizada em diversas áreas, entre elas, o uso do concentrador na secagem, gaseificação e outros processos em biomassa, por diversos pesquisadores, a saber:

- Ribas (2016) utilizou concentrador solar para o processo de gaseificação da biomassa conduzido para altas temperaturas advindas da radiação solar, trazendo a proposta de um reator químico, definindo parâmetros construtivos e operacionais de gaseificador, resultando em um gás mais homogêneo e de fácil manuseio, havendo ganho energético, redução das emissões de gás carbônico, quando comparado com a queima direta da biomassa, viabilizando o uso de matérias orgânicas como fontes de energia.
- Correia (2017), empregou um concentrador solar em uma unidade de produção de celulose para aumentar a temperatura da água condensada, levando-a para seu estado de vapor saturado a ser entregue na caldeira, pois neste tipo de indústria demanda um alto consumo de vapor e eletricidade. Este projeto teve como resultado economia no consumo de combustível e incremento na geração de potência a vapor.

O Brasil é o país de maior produção de cana-de-açúcar do mundo, cerca de 760 milhões de toneladas por ano, sendo que, para cada tonelada, 276 kg são representados por bagaço com 50% de umidade. Tornando o bagaço o maior resíduo da agroindústria brasileira. Como alternativa para minimizar os impactos causados pela grande quantidade de resíduos, o bagaço da cana-de-açúcar pode ser utilizado como biomassa, no entanto, devido à alta umidade, este material tem baixa eficiência (CHIEPPE, 2011) (SOARES e ROSSELL, 2006).

Como nova alternativa de destino ao bagaço da cana-de-açúcar, podemos citar diversos trabalhos, a saber:

- Graebin (2014) executou a secagem em estufa e secador convectivo, usando-o posteriormente como adsorvente potencial para remoção do metal níquel em regime de batelada;
- Restrepo (2016) utilizou um sistema de concentrador do tipo linear Fresnel para aquecer a água de alimentação dos geradores de vapor a uma temperatura mais alta, aumentando a produção de potência elétrica nas entressafras da cana-de-açúcar;
- Santos *et al.* (2020) executou a secagem do bagaço da cana-de-açúcar por concentrador solar focal, com auxílio do fluxo de gás, gerando biomassa agroindustrial, aumentando a eficiência da cogeração, obtendo a remoção de 82% da umidade inicial de 100 gramas do bagaço em 45 minutos de exposição solar;

E ainda, a destinação do bagaço da cana-de-açúcar, assim como o uso do concentrador solar pode ser aplicado em diversas áreas com diferentes objetivos, contudo, os reatores são poucos, ou sequer citados nos trabalhos. Por outro lado, o comportamento dos reatores é de extrema importância para a otimização dos sistemas, devendo ser analisados quanto a sua forma, material, entre outros fatores, avaliando a variação de temperatura, fadigas térmicas provocadas, vida à fadiga e confiabilidade estrutural, para alcançar a eficiência máxima do sistema.

O uso de métodos numérico na simulação estrutural para avaliação de tensões e deformações, devido à complexidade geométrica, tem sido cada vez mais empregado pelos pesquisadores. Neste trabalho foi empregado o Método dos Elementos Finitos (MEF) na modelagem numérica de concentradores solares para analisar as variações de temperaturas no receptor e suas tensões associadas. Para tal, escolheu-se o software *Abaqus*, onde é possível simular estruturas com carregamentos térmicos para se obter deformações e tensões. Este software se baseia no mecanismo de dividir os problemas em elementos de geometria mais simples, conhecido como elementos finitos, trazendo análises tipo estática, dinâmica e modal (MARANHÃO, 2016). Neste aspecto, podemos citar alguns trabalhos, a saber:

- Álvares e Herrera (2019) utiliza um concentrador solar do tipo fresnel, onde foi verificado que o peso próprio e forças do vento afetam a estrutura do mesmo, alterando

seu comportamento mecânico. Para analisar a estrutura foi feito o uso de simulação computacional com o MEF, analisando a ação da força da gravidade e deformações;

- Cetina-Quiñones *et al.* (2017) desenvolveu um modelo de Concentrador Solar Parabólico, onde por meio do MEF, utilizando software *SolidWorks* para a simulação, preveu o comportamento térmico do fluido de trabalho, ao longo do tubo receptor, estimando a eficiência térmica, envolvendo os processos de transferência de calor.

Neste trabalho é proposta a modelagem experimental de um receptor de concentradores solares usados no processo de secagem, torrefação e carvoejamento da cana-de-açúcar, bem como sua modelagem numérica com uso do MEF e o programa *Abaqus*, a fim de validar e correlacionar os resultados experimentados, analisando se o receptor é resistente à altas temperaturas e se haverá falhas por tensão térmica, possibilitando identificar soluções que possam reduzir estas tensões e, caso necessário, a mudança de algum material.

1.1 MOTIVAÇÃO

De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017), as médias diárias brasileiras de irradiação global no país variam entre 4,5kWh/m² e 5,5 kWh/m² e devido a estes bons números, o Brasil é um país de grande potencial solar térmico. A energia solar pode ser utilizada como solução para diversas dificuldades, como por exemplo, o agrupamento de radiação com objetivo de alcançar altas temperaturas, onde se deu origem aos concentradores solares.

A alta radiação solar no país também proporcionou a produção da cana-de-açúcar em grande escala, esta cultura obteve um bom desenvolvimento devido ao clima e ao tempo a que foi exposta. De origem asiática, trazida no período colonial pelos portugueses, com o objetivo de obter o açúcar como produto final, o plantio da cana-de-açúcar se difundiu em todo país que hoje lidera o *ranking* mundial. Porém, este cultivo traz grande quantidade de bagaço, 27% de toda plantação, transforma-se em resíduo, gerando impactos ambientais (SOARES e ROSSELL, 2006). Com o objetivo de minimizar os problemas ambientais, a utilização do bagaço vem sendo estudada, como a transformação deste em biomassa.

Por outro lado, devido à alta umidade, em torno de 50%, o uso desse resíduo tem baixa eficiência (SOARES e ROSSELL, 2006). Aliando a grande quantidade de radiação solar que o país recebe, e o intuito de aumentar a eficiência no uso do bagaço, este trabalho tem como justificativa empregar o uso de concentrador solar de receptor central para secagem do bagaço

da cana-de-açúcar, aumentando o seu poder calorífico, que além da utilização eficiente como biomassa, a redução da umidade também implica em menor peso e volume de resíduo, maior facilidade de transporte e manuseio, reduzindo custos.

Por haver escassez de análise de confiabilidade estrutural acerca dos tanques localizados no foco dos concentradores solares, há significativas dificuldades em se obter resultados competentes e possibilidades de otimização. Neste aspecto, o sistema quando utilizado concentrador de formato ou material inadequado, prejudica a eficiência, resultando em falhas no processo de transferência de calor do concentrador para o tanque, assim como do tanque para o material, havendo baixa absorção de calor, troca de gases com o meio ou deformações causadas pelas variações de temperatura, promovendo até fadiga térmica do material.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal modelar e analisar, experimental e numericamente, um receptor de concentradores solares usado no processo de secagem, torrefação e carvoejamento da cana-de-açúcar, devido à variação de temperatura e seu fluxo.

Como objetivos específicos podem ser citados:

- Construir modelos físicos de concentradores solares de área de 1 m² e 2,5 m², a fim de testar a variação de temperatura no foco;
- Otimizar a melhor angulação dos espelhos para aumentar alcançar a máxima variação de temperatura, ou seja, obter a melhor capacidade térmica do concentrador solar;
- Ensaiai os três receptores utilizando água para verificar a potência dos concentrador es e ensaiar com bagaço da cana-de-açúcar, para testar a secagem do material;
- Comparar os resultados obtidos nos experimentos dos receptores de concentradores solares, a fim de encontrar uma relação de temperatura alcançada e taxa de concentração;
- Modelar o receptor de concentrador solar mais eficiente, utilizando o software *Abaqus*, para obter tensões provenientes da exposição do receptor a variações de temperaturas;
- Realizar simulações térmicas visando encontrar os gradientes de temperatura que produzem as tensões térmicas.

CAPÍTULO 2

CONCEITOS INICIAIS

Este capítulo apresenta os conceitos iniciais sobre energia solar e sua difusão no mundo, concentradores solares e suas diferenças, as barreiras enfrentadas pela alta quantidade de resíduos provenientes da grande produção de cana-de-açúcar no Brasil e a aplicação do Método dos Elementos Finitos para resolver problemas complexos de engenharia.

2.1 ENERGIA SOLAR

Fonte de energia inesgotável, o Sol é responsável pelo desenvolvimento e manutenção da Terra, sendo uma alternativa energética promissora ao homem. Dentre todas as fontes de energias alternativas que vem sendo utilizadas pelo homem dependem indiretamente do Sol, exceto energia nuclear, geotérmica e marés. A energia solar vem se difundindo por meio da conversão fotovoltaica e térmica. A conversão fotovoltaica converte diretamente a energia luminosa em eletricidade, através do efeito fotovoltaico. Já a conversão térmica capta a energia térmica solar para utilização imediata ou geração de eletricidade do processo termodinâmico (GALDINO, LIMA, *et al.*, 2000).

Utilizada principalmente para eletricidade e aquecimento, a energia solar já representa 40% de toda energia renovável produzida no mundo, portanto, um tipo de energia bastante popularizada. Esta popularização se deu principalmente pelo baixo custo de operação e manutenção, que além do efeito ecológico, bastante discutida nas últimas décadas. O clima e o tempo são os fatores de maior influência na eficácia e eficiência da utilização de energia solar. A variação da latitude é um fator que incide diretamente na exposição à radiação solar de uma determinada localização, a proximidade com os polos do planeta reduz a radiação solar. Já a variação do tempo causa mudanças momentâneas na eficiência, como a intermitência causada no tempo nublado (ADELAKUN e OLANIPEKUN, 2019).

Apenas no ano de 2021, a capacidade instalada de energia solar mundial teve um aumento de 18,5% quando comparado a 2020, chegou a aproximadamente 849,48 GW (Figura 1). A China lidera o *ranking* com 36,14% do total instalado, entregando para a Ásia a maior capacidade de energia solar do mundo (Figura 2), enquanto o Brasil obtém 1,54% (IRENA, 2022).

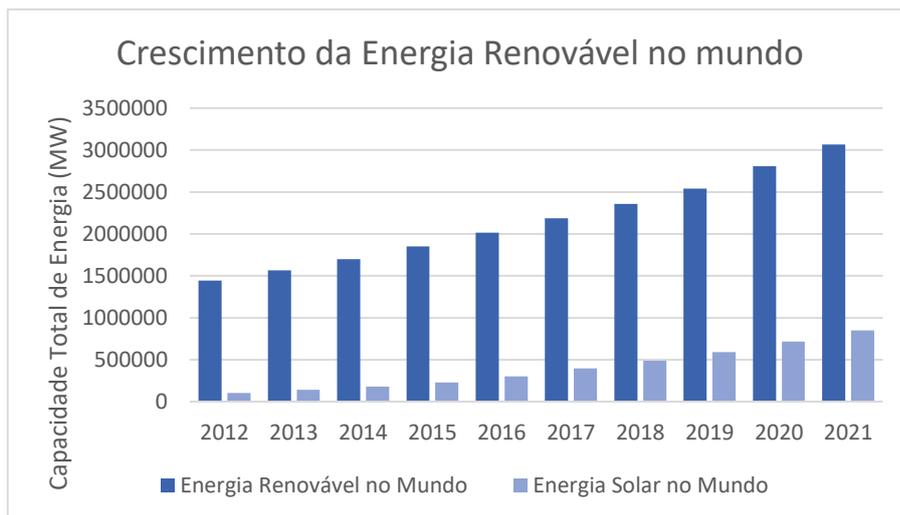


Figura 1 - Crescimento da Energia Renovável em 10 anos

Fonte: IRENA adaptado (2022)

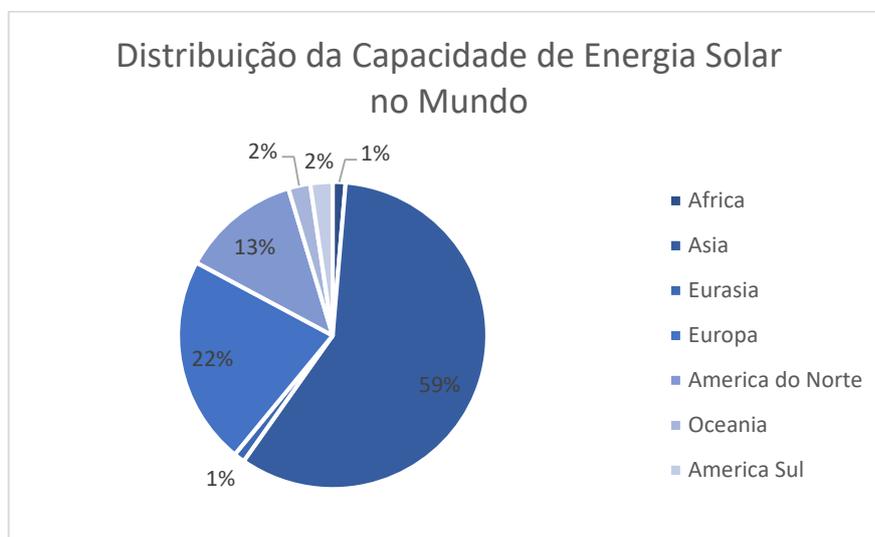


Figura 2 - Distribuição da Energia Solar nos Mundo

Fonte: IRENA adaptado (2022)

2.2 CONCENTRADOR SOLAR

A energia solar pode ser gerada por meio de concentrador de energia solar, células solares, painéis fotovoltaicos, coletor solar para aquecimento de água, entre outros. Os painéis fotovoltaicos são placas planas, onde as áreas de intercepção e absorção da radiação solar são as mesmas, já os concentradores solares têm superfície, constituída de lentes ou espelhos, que direcionam a radiação solar, para que se concentre em um foco, onde estar o receptor, coletando

energia térmica (Figura 3), que pode vir a ser transformado de acordo com a necessidade, como a transformação em energia elétrica (NOWZARI, 2020).

O ângulo de inclinação da superfície determinará a concentração de energia no foco, um sistema de rastreamento solar pode ser a forma mais precisa de se alcançar a máxima concentração de energia. Este ângulo dependerá da radiação solar do local onde o equipamento está localizado, onde com o auxílio de um pirômetro, será medida a potência da fonte de luz ou fluxo (AL-ROUSAN, ISA e & DESA, 2018).

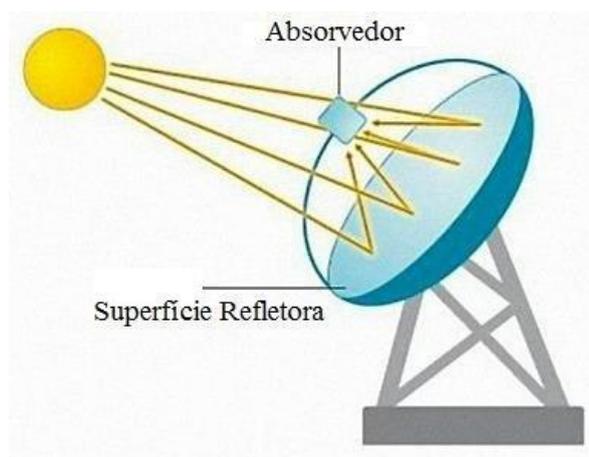


Figura 3 - Esquema de concentrador solar

Fonte: <https://www.researchgate.net/publication/300656448>

2.2.1 Tipos de concentradores

Os concentradores solares são utilizados para aumentar a radiação nos receptores, ou seja, possui uma maior eficiência termodinâmica devido à pequena área do foco em que há perda de calor, comparando com a área total do concentrador, além de requerer uma estrutura simples. Podem ser refletores ou refratores; cilíndricos, concentrando em uma linha (Figura 4 e Figura 5), ou circular, para se concentrar em um ponto (Figura 6 e Figura 7); além destas configurações, os receptores podem ser côncavos, planos ou convexos. A eficácia dos concentradores solares depende do ângulo de incidência do feixe, por isso a importância do uso de rastreadores solares para alinhá-los na posição correta. Esses ajustes são feitos no azimute (eixo horizontal), no zênite (eixo vertical), no eixo de rotação paralelo ao eixo da terra e outro eixo de rotação perpendicular ao eixo da terra (DUFFIE e BECKMAN, 2013).



Figura 4 - Concentrador cilíndrico parabólico localizado em Aparecida de Goiânia (GO)

Fonte: Canal Solar (2021)



Figura 5 - Concentrador solar tipo Fresnel Linear localizado em Florianópolis (SC)

Fonte: g1.globo.com (2019)



Figura 6 - Concentrador solar com foco pontual em usina solar no Arizona, USA

Fonte: laenergiasolar.org (2021)



Figura 7 - Concentrador solar de Torre Central da Usina Ashalim em Israrel

Fonte: gazetadopovo.com.br (2021)

Diversos tipos de concentradores solares já estão sendo utilizados em todo o mundo, dentre eles estão os coletores de placas parabólicas são sistemas com estruturas leves e tecnologia de baixo custo, com temperaturas chegando até 400 °C. Este se trata de uma placa em forma parabólica de material reflexivo, quando ajustada a posição do sol, reflete os raios no tubo receptor. Os coletores de Fresnel podem ser construídos com lentes ou refletores linear. As lentes são produzidas em material plástico para focar os raios solares em um receptor pontual, já os refletores são espelhos dispostos linearmente, onde concentram a luz em um receptor linear. Os espelhos podem ser montados em local plano e concentrar a luz em um receptor fixo, montado em torre. Este tipo de sistema tem baixo custo, pois não necessitam de montagem em altura, e os espelhos utilizados não precisam de curvatura (KALOGIROU, 2009).

As placas parabólicas rastreiam o sol em dois eixos e contém um receptor pontual. Podem atingir temperaturas superiores a 1500 °C. São mais eficientes pela vantagem de rastreamento solar, tem altas taxas de concentração, absorvendo energia térmica e conversão de energia. Os coletores de campo heliostático (receptor central) têm alta energia radiante devido à grande quantidade de espelhos planos. A energia térmica absorvida pelo receptor é transferida para um fluido circulante que pode ser armazenado e usado posteriormente na geração de energia. Por ter apenas um ponto focal, tem menos dissipação de energia no transporte, alcança temperaturas de 300 °C a 1500 °C, sendo um sistema eficiente. Dentre os coletores apresentados acima, considerando a transformação de energia solar em elétrica, a placa parabólica contém a melhor eficiência, equivalendo a 16-18%, seguido da calha parabólica (10-15%), refletor Fresnel (9-11%), por fim o receptor central com eficiência entre 8 e 10%. A proporção de abertura para a

área receptora de um coletor solar, chamada de taxa de concentração, irá variar de acordo com o tipo de concentrador a ser utilizado, em concentradores do tipo coletor de calha parabólica, esta taxa varia de 10 a 85%, já para os concentradores tipo refletor Fresnel Linear, a variação da taxa de concentração encontra-se entre 10 a 40%, para concentradores tipo placa parabólica, a proporção varia de 600 a 2000% e por fim o receptor central, que conterà uma taxa de concentração de 300 a 1500% (KALOGIROU, 2009).

Para aumentar a eficiência dos concentradores solares, é essencial direcionar os raios de sol ao receptor do concentrador, isto é feito por meio do sistema de rastreamento solar, que modifica a posição dos painéis de espelhos ou lentes, em relação ao receptor. Este rastreamento mantém os módulos solares fotovoltaicos em um ângulo de melhor incidência, onde é capaz de seguir a movimentação solar, capturando a máxima quantidade de raios. Para chegar a tal resultado, o sistema depende de algumas variáveis, como a irradiação solar média diária, latitude, ângulo de incidência, inclinação, orientação, azimute solar, declinação, inclinação, elevação e zenital (AL-ROUSAN, ISA e & DESA, 2018).

O desempenho de concentrador solar depende principalmente de dois fatores, o fator de perda de calor (F_i) e do fator de eficiência ótica (F_{ef}). O fator de perda de calor depende da temperatura no receptor e da velocidade do vento. O fator de eficiência ótica define o limite máximo de eficiência total teórica e depende da perfeição geometria dos refletores, da refletância e da absorbância do receptor. Três procedimentos podem ser usados para determinar o fator de eficiência ótica, sendo estes métodos empregados próximos do meio-dia, quando a radiação solar é intensa e praticamente constante, são eles:

1. Determinação do fator de eficiência ótica pela curva de calor sensível em carga máxima;
2. Método de fluxo no estado estacionário;
3. Método usando água com gelo.

De acordo com Kumar et al. (1995), os métodos 1 e 3 são mais práticos, fornecem resultados mais exatos e com menor incerteza. Utilizando o método de determinação de F_{ef} pela curva de calor sensível em carga máxima, adotam-se os seguintes passos:

- Coloca-se 1L de água no receptor de liga de alumínio preto;
- Põe o recipiente no foco;
- Adiciona um termopar na água;
- Inicia a cronometragem do intervalo de tempo assim que o líquido é exposto ao sol.

$$F_{ef} = \frac{F_l}{C} \cdot \frac{\left(\frac{T_{w2}-T_a}{I_b} - \frac{T_{w1}-T_a}{I_b} e^{-\tau/\tau_0} \right)}{1 - e^{-\tau/\tau_0}} \quad \text{eq. (1)}$$

onde:

C – Proporção de abertura da área do concentrador em relação a área do receptor;

τ_0 - Constante retirada da curva de resfriamento, registrada na queda de temperatura da água, sombreando o concentrador;

τ – Intervalo de tempo da temperatura da água de T_{w1} a T_{w2} ;

T_w – Temperatura da água na panela;

T_a – Temperatura ambiente;

I_b - Intensidade da radiação difusa;

$$F_l = \frac{(MC_p)'_w}{A_t \tau_0} \quad \text{eq. (2)}$$

$(MC_p)'_w$ – Derivada da capacidade de calor da água;

A_t – Área do receptor;

A irradiação solar, também chamada de intensidade da luz, é um parâmetro importante para instalação do sistema de rastreamento, medindo a potência da fonte de luz ou fluxo, essa medida é feita por um piranômetro. A latitude determina a distância angular da linha do equador. O ângulo de incidência é o ângulo entre os raios do sol na superfície e os raios perpendiculares à superfície. O ângulo de declinação é o ângulo entre o equador e uma linha desenhada do centro do sol até o centro da terra. Os ângulos de elevação e zênite é a altitude do sol e o ângulo entre o centro do sol e o vertical, respectivamente. O ângulo de inclinação é o ângulo entre o sistema de rastreamento e o eixo horizontal e o ângulo de orientação é usado para mover um sistema de rastreamento, a fim de alcançar a máxima concentração de energia. O ângulo do azimute é medido em relação ao sul, distância angular entre a projeção da linha de visão do sol no solo e ao sul (AL-ROUSAN, ISA e DESA, 2018).

2.2.2 Locais adequados para uso de concentrador

O potencial de geração de energia por concentrador solar dependerá da posição geográfica que o equipamento está instalado. Utiliza-se o DNI (Irradiância Normal Direta), que é a irradiação solar coletadas por um plano normal, para classificar os valores de radiação em 4 zonas (Tabela 1). A zona IV não é adequada para instalação de equipamentos com intuito de geração de energia solar (RĂBOACĂ, BADEA, *et al.*, 2019). O DNI é caracterizado pela taxa de energia por unidade de área, proveniente do sol incidido na superfície (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2017).

Tabela 1 - Zonas de DNI

Zona	Máximo ao ano (kWh/m ² ao ano)	Mínimo ao ano (kWh/m ² ao ano)
I	3652	2800
II	2800	2100
III	2100	1700
IV	1700	365

Fonte: RĂBOACĂ et al, 2019 (adaptado)

O Brasil está localizado em uma faixa de latitude com alta incidência solar, que comparado com países desenvolvidos, apresenta uma vantagem significativa (GALDINO, LIMA, *et al.*, 2000). Corroborado por Martins, Pereira & Abreu (2007) na elaboração de mapas de irradiação direta normal e global, no Brasil 25% da área total apresentam irradiação acima de 2000 kWh.m⁻².ano, ou seja, fazendo parte da ZONA II, contendo condições ótimas para instalação de sistemas concentradores de radiação solar.

2.3 RECEPTOR SOLAR

Usado no foco do concentrador solar, o receptor tem função de captar a radiação e fazer sua transformação. De acordo com (CUCE e CUCE, 2013), utilizam a luz solar para promover secagem de frutas, aquecimento ou cozimento de alimentos, entre outras utilidades por meio de um sistema de fogão solar. Eles podem ser classificados em fogão tipo caixa, fogão

concentrador, fogão de placa solar (Figura 8). O tipo caixa funciona como um forno comum, uma espécie de estufa os raios solares passam para dentro da caixa por meio de um material transparente, mantendo o calor no interior por meio de isolamento térmico. O fogão concentrador detém a radiação solar e concentra em um foco, geralmente do tipo côncavo, necessita de luz solar direta e acompanhamento da trajetória do sol, chegando a uma eficiência de 26,6%. O fogão de placa solar é o mais utilizado, no entanto fornece um poder de cozimento muito limitado, usa-se um equipamento reflexivo para direcionar os raios solares para um recipiente dentro de um saco plástico transparente, geralmente é feito de papelão e revestido de material reflexivo, como o papel alumínio.

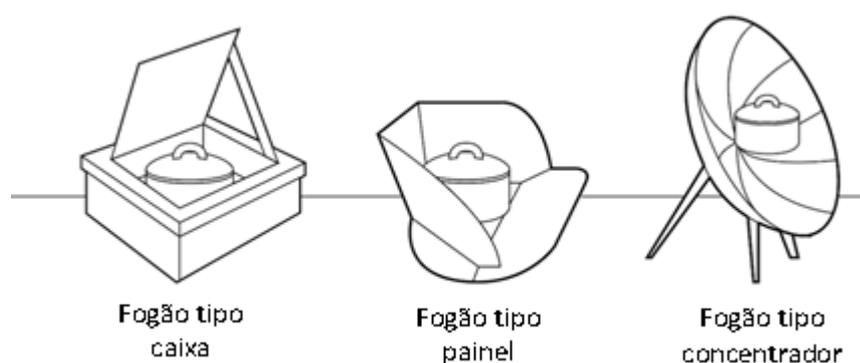


Figura 8 - Tipos de fogões segundo a classificação de Cuce & Cuce

Fonte: <http://www.oneearthdesigns.org/> (2022)

Para Aadiwal, Hassani & Kumar (2017), existem mais de 65 designs principais de fogão solar e variações destes, no entanto, o princípio básico de funcionamento são os mesmos e se dividem em: concentrador de raios solares, onde um material reflexivo é usado para concentrar a luz solar, conseqüentemente o calor, para uma pequena área; a conversão de luz em calor, onde utiliza um recipiente preto para melhorar a eficiência de transformação; por fim a retenção de calor, onde isola o ar dentro do fogão, utilizando um sólido transparente que permite que a luz entre e seja absorvida e convertida em calor.

Em resumo, para Aadiwal, Hassani & Kumar (2017), a classificação dos fogões solares é a mesma de Cuce & Cuce (2013), fogão de painel solar, fogões parabólicos solares e fogões solares do tipo caixa. Onde o painel solar tem uma placa plana que reflete e concentra a luz, no entanto limitado. Os parabólicos podem atingir altas temperaturas, consistindo em um refletor parabólico com recipiente localizado no ponto de foco do fogão e suporte para apoiar o sistema. O fogão tipo caixa é um recipiente pintado com tinta preta para melhorar absorção, tampa de

vidro duplo e revestimento externo com isolamento (com lã de vidro, por exemplo) para diminuir as trocas de calor com o meio ambiente.

Kimambo (2017) divide a classificação dos fogões solares em quatro tipos, são elas: fogão solar do tipo caixa, fogão tipo painel, fogão tipo coletores e fogões concentradores ou refletores. Diferindo dos demais autores no fogão do tipo coletores, se trata de um sistema de duas partes com um invólucro, sendo um coletor de raios com placa plana e espelhos laterais e a parte do fogão para cozimento, explorando a produção (Figura 9). A grande vantagem deste tipo de fogão é que não há contato do usuário com a radiação ou o calor, protegendo da radiação, utilizando óleo como meio de transferência de calor para que temperaturas mais altas sejam alcançadas. Comparando as classificações entre os fogões solares dos autores citados, apenas Kimambo (2017) tem uma classificação mais ampla, os demais trabalham com os mesmos princípios, diferenciando apenas pela nomenclatura de alguns tipos.

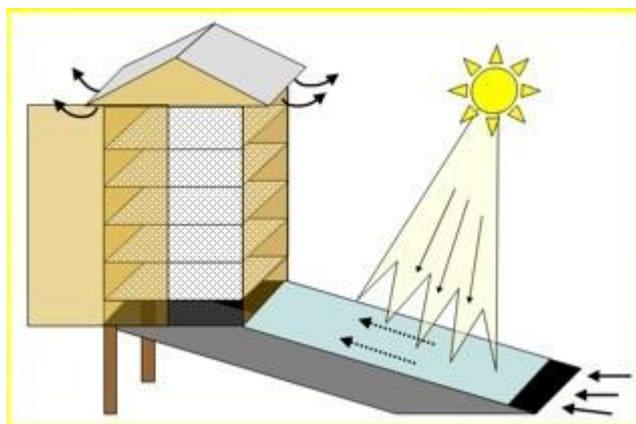


Figura 9 - Fogão Solar Tipo Coletor

Fonte: <http://www.sempresustentavel.com.br> (2021)

O fogão solar tipo caixa contém vantagens de utilização direta da luz solar, de modo fácil e seguro de usar e construir, onde requer pouca intervenção do operador e possui boa tolerância para rastreamento de erros. No entanto, os concentradores têm desempenho térmico amplamente divergente, ocasionando um cozimento lento. O fogão do tipo painel tem um desempenho melhor que o fogão tipo caixa, contudo em condições nubladas, este desempenho diminui bastante por ficar dependendo mais da radiação refletida. O fogão coletor tem radiação difusa e direta, esta característica traz temperaturas mais altas, mesmo sendo simples e seguro de utilizar, contudo sua construção é mais rebuscada quando comparado aos outros modelos e além de um custo maior. Por fim o fogão concentrador, onde apresenta temperaturas extremamente altas e cozimento rápido, ou seja, ótima eficiência, no entanto, sua utilização é

mais complexa, necessita de maior atenção do operador pois pode causar problemas de saúde se usado de forma incorreta, é influenciado pelo vento e pode ter um custo relativamente caro (KIMAMBO, 2017).

Além de aquecimento e cozimento de alimentos, fogão solar também pode ser utilizado para a destilação de água, onde é usado um fogão semelhante ao tipo caixa, com recipiente de fundo preto para absorção de raios solares e tampa de vidro. Água salgada é colocada no recipiente. Com o aumento da temperatura a água é evaporada, aumenta a umidade do local, formando correntes de convecção dentro do destilador. O ar úmido sobe devido à diferença de densidade, concentrando na parte interior da tampa, contudo, a tampa é inclinada, em formato piramidal, permitindo que a água escorra na cuba coletora já dessalinizada (FARIA, ALVES, *et al.*, 2015)

2.4 CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar tem origem asiática, onde necessita de altas temperaturas e alta radiação solar, além de um longo período para seu crescimento, tais características conseguem um bom desenvolvimento em regiões tropicais e subtropicais. Esta cultura não tem necessidade de um tipo especial de solo, no entanto, solos com profundidade de mais de um metro seja ideal. Os atributos citados se assemelham muito com o clima brasileiro, onde a plantação da cana-de-açúcar é altamente difundida, liderando o *ranking* de maior produtor do mundo, chegando a 40% da produção mundial em 2020 (Figura 10) conforme a Organização de Alimentos e Agricultura das Nações Unidas.

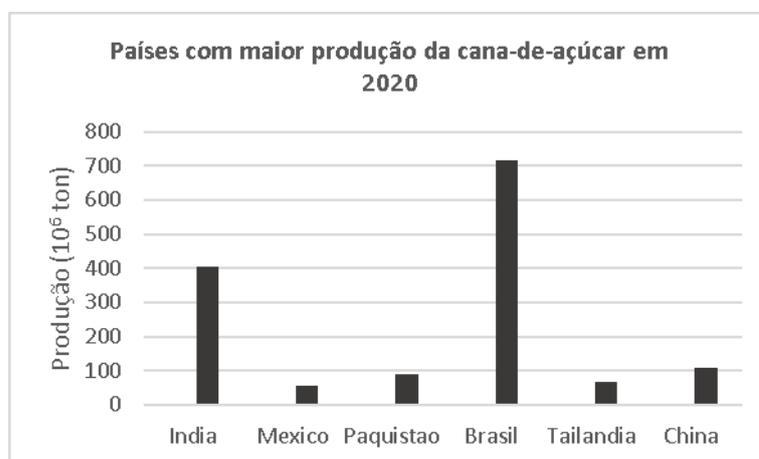


Figura 10 - Países com maior produção de cana-de-açúcar em 2020

. Fonte: FAOSTAT (2023)

A cana-de-açúcar é responsável pela produção de 80% do açúcar mundial, o restante é praticamente proveniente de beterraba sacarina. Diferente da cana-de-açúcar, a beterraba sacarina necessita de clima temperado úmido, com períodos secos e ensolarados pouco antes da colheita, portanto, sendo mais comum na Europa Central e Oriental e em parte dos Estados Unidos. A taxa de extração de açúcar da cana-de-açúcar pode variar entre 30% e 100%, enquanto a taxa da beterraba varia entre 40 a 80%. A cana-de-açúcar também gera produtos combustíveis que são viáveis e comerciais, contendo alto teor de biomassa e possuindo alta eficiência na conversão da energia solar (FAOSTAT, 2009).

Outra cultura semelhante a cana-de-açúcar é o sorgo, no entanto produz entre 43 e 48% de etanol e 70 a 75% de biomassa em relação a cana. Devido ao ciclo de vida curto, o sorgo vem sendo utilizado entressafras da cana, para produção de etanol, cooperando como alternativa viável para rotação de cultura (SANTOS, 2011).

Na última década a produção da cultura se manteve estável no Brasil (Figura 11), com produção em torno de $750 \cdot 10^6$ toneladas por ano, cerca de 200% maior do que a produção da Índia, segundo maior produtor mundial, seguido de China, Tailândia, Paquistão e México. De acordo com o Balanço Energético Nacional, em 2021, os produtos da cana-de-açúcar geraram 49.423.000 toneladas equivalente de petróleo, totalizando 14,67% de toda energia primária produzida no país (Figura 12).

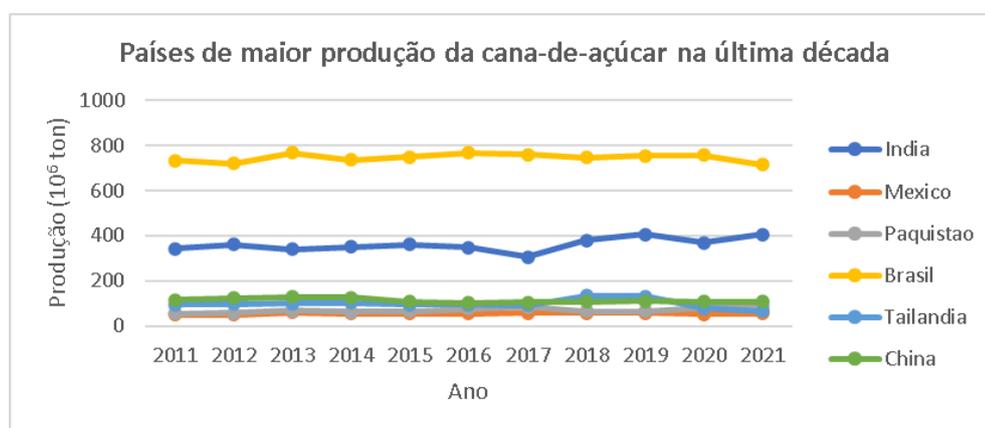


Figura 11 - Países de maior produção de cana-de-açúcar na última década

Fonte: FAOSTAT (2023)

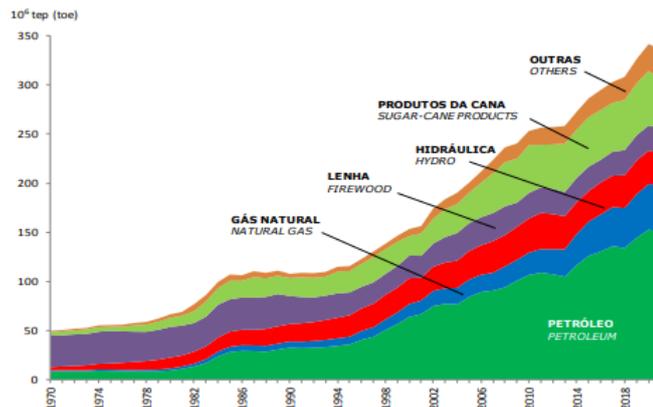


Figura 12 - Produção de energia primária no Brasil

Fonte: BEN (2022)

O potencial energético da cana-de-açúcar está dividido em caldo, bagaço e palha (incluindo folhas e pontas), aproximadamente 1/3 para cada parte da energia total. Em uma tonelada de cana de açúcar é encontrado 153 kg de açúcar, 276kg de bagaço com 50% de umidade e 165 kg de palha com 15% de umidade (SOARES e ROSSELL, 2006).

Diante destes dados e o cultivo em larga escala desta matéria prima, o bagaço se tornou um resíduo de alto impacto pela quantidade produzida. O crescimento da moagem e até mesmo as unidades que não se utilizam da co-geração por meio do bagaço tem dificuldade na destinação do armazenamento, deixando ao ar livre, expostos a chuva e vento. No processamento da cana existe a necessidade de uso intenso de energia térmica, elétrica e mecânica e muitas usinas de açúcar e álcool já utilizam o bagaço da cana para suprir sua própria demanda energética. Por meio da queima em caldeiras, mesmo que possua baixa eficiência energética devido a alta umidade, onde dificulta seu reuso para geração de energia, assim como em outros meios alternativos.

2.4.1 Meios alternativos para destinação do bagaço da cana-de-açúcar

Beneficiamentos de combustíveis para aumentar sua densidade energética e porventura, armazenar essa energia de forma química, para ser utilizada sobre demanda ou facilitar questões logísticas pela redução da massa, ou ainda a secagem de biomassa, pode ser uma aplicação eficiente da energia solar. Para aumentar a produtividade na fabricação de biocombustíveis e bioquímicos de segunda geração e geração ou cogeração de energia elétrica, a cana-de-açúcar

foi geneticamente modificada, produzindo a cana-energia, contendo elevado teor de fibras, baixo teor de açúcar, obtendo maior quantidade de biomassa por área, equivalente a 3 vezes mais produtiva que a cana comum. A cana-energia está sendo cultivada em Alagoas e vem sendo analisada pela GRANBIO, que registrou a patente Cana-Vertix, em 2015. (GRANBIO, 2020).

Outro modo para produção do biocombustível que vem sendo utilizado a partir da cana-de-açúcar é o etanol de segunda geração, tendo uma alta redução na emissão de gases de efeito estufa. Devido aos materiais lignocelulósicos, que contém grande quantidade de açúcar, o etanol de segunda geração é obtido após a extração do caldo do bagaço ou usando a palha, por meio do processo de hidrólise, tornando o material aproveitável, produzindo mais etanol. A fabricação do bioetanol também pode ser a partir do melaço que não retorna ao processo de fabricação de açúcar, onde é fermentado e destilado (BNDES e CGEE, 2008).

A partir do bagaço da cana-de-açúcar também vem sendo produzido polímeros polihidroxibutirato (PHB), por meio de bactérias que se alimentam do bagaço. Estas bactérias são do tipo *Ralstonia eutropha* que apresentam altas taxas de produção e rendimento, no entanto, outras espécies de bactérias também vêm sendo usadas para estudos, como espécies de *Ralstonia eutropha*, *Alcaligenes eutrophus* e *Burkholderia sacchari*. Devido à alta biodegradabilidade do PHB em ambientes biologicamente ativo, este polímero é uma ótima alternativa para a substituição de plásticos convencionais (TELLES, SARAN e UNÊDA-TREVISOLLI, 2011).

2.5 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Em uma análise de um sistema de engenharia existe a necessidade de idealiza-lo de forma que possa ser resolvido, onde formula um modelo matemático que entre a solução desse modelo e a interpretação dos resultados (BATHE, 1996).

Com a necessidade de resolver problemas complexos envolvendo elasticidade e análise estrutural, iniciou a subdivisão de todos os sistemas em elementos individuais, onde o comportamento consegue ser compreendido para então reconstituir o sistema original (ZIENKIEWICZ, TAYLOR e ZHU, 2005).

Este método de resolução, que subdivide o sistema em meio contínuo em componentes menores de geometrias simples, diminui a complexidade do domínio, apresentando novas dimensões finitas. Nesta discretização, as novas geometrias são conectadas por nós, criando uma malha, podendo ser uni, bi o tridimensional. A quantidade dos nós e elementos, assim como tamanho e elementos presentes na malha irão indicar a precisão, e, portanto, se a quantidade de nós tender a zero, a solução será exata. (SOUZA, 2003).

Nomeado como Método dos Elementos Finitos (MEF), este método é empregado na análise de sólidos, estruturas e transferência de calor e fluídos, onde determina o estado de tensão e deformação de uma estrutura sujeito a ações exteriores (AZEVEDO, 2003). Esse procedimento, em essência, reduz o modelo matemático do sistema contínuo em uma idealização discreta que pode ser resolvida da mesma maneira que um modelo de parâmetros concentrados. Sua resolução, além de teoria, contém alto grau de desenvolvimento, e como resposta, o resultado deve ser eficiente e aplicável na análise da engenharia (BATHE, 1996).

No geral, um modelo adequado é obtido usando um número finito de elementos bem definidos, ou seja, um modelo discreto. Problemas contínuos possuem vários métodos de discretização, onde envolvem uma aproximação da verdadeira solução. Técnicas utilizando equações diferenciais, como aproximações por diferenças finitas, ou procedimentos residuais ponderados ou técnicas para determinar a estacionaridade adequada (ZIENKIEWICZ, TAYLOR e ZHU, 2005).

Em modelos matemáticos simples, satisfazendo todas as equações de contorno e seguindo os procedimentos numéricos gerais, as equações diferenciais encontram a solução exata (BATHE, 1996). Durante análise de problemas de natureza discreta, desenvolveu-se uma metodologia padrão. Inicialmente, calcula-se a relação força e deslocamento para cada elemento da estrutura, seguindo de procedimento bem definido para encontrar o equilíbrio local em cada “nó” ou ponto de conexão da estrutura, onde por fim obtém a equação resultante, encontrando os deslocamento não conhecidos (ZIENKIEWICZ, TAYLOR e ZHU, 2005).

A solução do sistema fornece valores das incógnitas nos pontos nodais, onde aqueles que tem nós comuns com diferentes elementos, contém o mesmo valor. Estes valores são fornecidos pelo sistema global das equações, definidos a partir de matrizes originadas pela malha de elementos. Para cálculo de pontos nodais são utilizadas aproximações locais, onde funções de interpolações são usadas a partir de um ponto conhecido, para encontrar os valores das incógnitas de um ponto (ALVES, 2007).

Quanto maior o número de elementos e nós, mais exata será a solução, no entanto, o tempo computacional e o custo também aumentam. Os softwares são capazes de determinar a temperatura em cada nó e fluxo por meio de cada elemento, sendo gerados resultados em gráficos de contorno (FISH e BELYTSCHKO, 2009).

No início dos anos 60, estudos a cerca desse tema foram bastante progressos, tendo como pioneiros Argyris e Kesley em 1955 (republicada em 1960) e por Turner, Clough, Martin e Topp (1956), Bathe (1962) e Zienkiewicz (1967). E com o desenvolvimento dos primeiros programas de elementos finitos, entre eles o de E. Wilson, de análise de tensões bidimensional, o método dos elementos finitos ganhou uma rápida popularidade, principalmente devido a sua utilização livre, sendo modificado para pesquisas e posteriormente pela NASA, ampliando para análise tridimensional em vigas e elementos de casca, analisando estruturas complexas, entre elas vibrações e respostas transientes de cargas dinâmicas. Em 1969 foi lançado o software ANSYS, com objetivo de resolver problemas lineares e não lineares e logo sua utilização cresceu. Em 1978, a companhia HKS lançava o programa ABAQUS para a utilização em aplicações não-lineares, mas gradualmente inseriu as aplicações lineares, muito usado por pesquisadores (FISH e BELYTSCHKO, 2009).

2.5.1 Abaqus

O Abaqus é um software versátil, com vários módulos, para ser aplicados em problemas de engenharia, entre os módulos, contém os gráficos CAE, um pré-processador, Viewer (pós-processador) e os módulos principais STANDARD e EXPLICIT. O pré-processador permite uma definição da geometria de forma eficiente, atribuindo propriedades dos materiais, carregamentos, condições de contorno e etapas pretendidas na análise, gerando uma malha de elementos finitos ao objeto. Com a malha finalizada e os dados de entrada do problema, executa a simulação computacional pelo método dos elementos finitos com os módulos Standard ou Explicit (ABAQUS/CAE, Versão 6.11).

Este software utiliza o método dos elementos finitos do deslocamento, com aproximação das condições de equilíbrio do corpo, analisando cada ponto do material. Estas equações de equilíbrio utilizam a metodologia dos trabalhos virtuais, com tensões residuais usadas como 65 condições de contorno, definindo elementos de um estado de tensões iniciais (CONCER, 2011).

Por fim o pós-processador, módulo Viewer, que interpreta os resultados numéricos, visualização gráfica e animação (ABAQUS/CAE, Versão 6.11). O *Abaqus* simula problemas

com geometrias complexas, grandes deformações, assim como carregamentos transientes e interações entre os materiais, fazendo-o um software de grande complexidade, devendo ser operado por usuários de bom conhecimento físico (CONCER, 2011).

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODO

Neste capítulo abordamos o material e métodos empregados para realização do trabalho. Inicialmente, sobre o local onde se processou os ensaios e se deu a construção dos concentradores solares. Em seguida, sobre os experimentos em água e bagaço da cana-de-açúcar, bem como a caracterização dos reatores. Por fim, escolha do reator mais eficiente para ser modelado por meio do software *Abaqus*, utilizando os parâmetros da modelagem experimental, obtendo deformações e tensões proveniente das variações de temperatura.

3.1 LOCAL E PROCESSO DO ENSAIO

Os concentradores construídos estão localizados na Embrapa Agroenergia, Parque Estação Biológica S/N, Av. W3 Norte (final), 780770-901, Brasília – DF, Brasil, onde são feitos os ensaios. O bagaço de cana-de-açúcar é distribuído uniformemente no recipiente e é medida a temperatura a cada um minuto e o material é pesado a cada 15 minutos para verificar a perda de umidade no concentrador de 1m², no concentrador de 2,5 m², a medição de temperatura é feita a cada minuto e verificação da massa do material é realizado ao fim do ensaio devido ao pequeno tempo para alcançar secagem, torrefação ou carvoejamento.

3.2 MATERIAIS

O material utilizado no experimento foi obtido por meio de doação da empresa Albioma, proveniente da Usina Jalles Machado, Fazenda São Pedro, na cidade de Goianésia-Goiás. Trata-se do bagaço da cana-de-açúcar, da espécie *Saccharum officinarum*, do tipo Caiana. Após processo de moagem, o material foi armazenado em ambiente refrigerado no Laboratório de Processos Químicos, na Embrapa Agroenergia.

O bagaço da cana-de-açúcar contém como composição elementar carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio, este material será caracterizado antes e após o processamento, para determinar os teores de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo, além do poder calorífico do

bagaço (PCS e PCI) e temperaturas de fusibilidade das cinzas produzidas em laboratório. Todos os ensaios citados foram feitos no laboratório da Embrapa Agroenergia.

3.3 CONCENTRADORES SOLARES

Foram construídos 02 concentradores solares de áreas diferentes, com 1 m² e 2,5 m². O concentrador de 1m² (Figura 13) foi construído com madeira compensada, barras metálicas, parafusos e espelhos. Foram utilizados 25 espelhos de 0,2x0,2m, montados sobre a madeira compensada que proporciona regulares da posição relativa dos espelhos, de modo que a angulação concentre os raios no receptor.



Figura 13 - Concentrador solar de 1m² e 25 espelhos, montado na Embrapa Agroenergia.

Este concentrador não possui rastreamento solar mecanizado, sendo toda movimentação feita manualmente. O equipamento possui a base com 04 rodas para facilitar o transporte do equipamento e facilitar a operação. Toda a estrutura é metálica, possuindo eixo de rotação nas laterais do concentrador (Figura 14), utilizando parafusos, porcas e arruelas.



Figura 14 - Eixo de rotação do painel

O painel foi estruturado a partir de cantoneiras, formando um quadrado e sobre elas um suporte para fixar cada painel de madeira compensada e acima, o espelho. Para um direcionamento adequado da radiação por meio dos espelhos, foi utilizado um parafuso sextavado, uma porca longa e uma contra porca comum, travando a posição do espelho na calibração necessária (Figura 15).

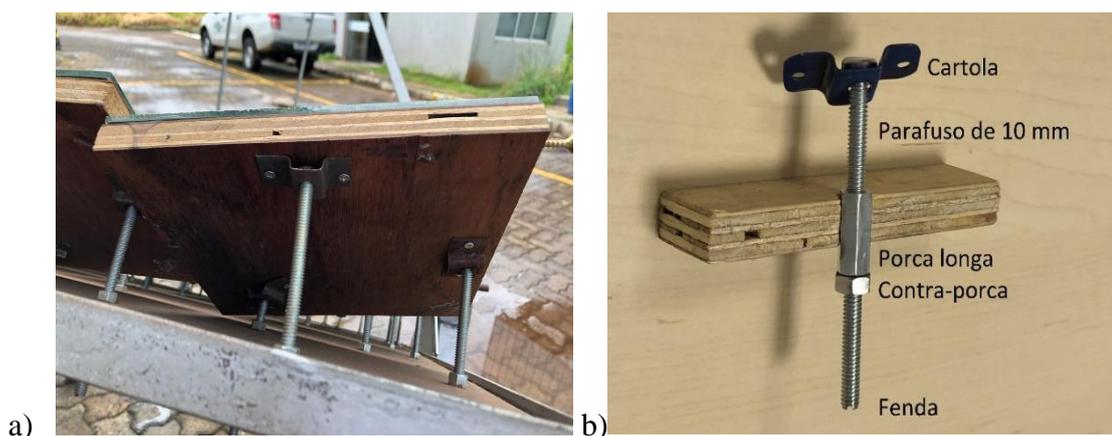


Figura 15 - Calibração dos espelhos

Para a construção do foco, utilizou de barras chatas nas laterais e na parte inferior do painel, conforme (Figura 16), no topo das barras fixou duas barras para soldar o suporte do recipiente, de formato circular, onde é possível rotacionar o parafuso para adaptar ao diâmetro do reator que for utilizar.

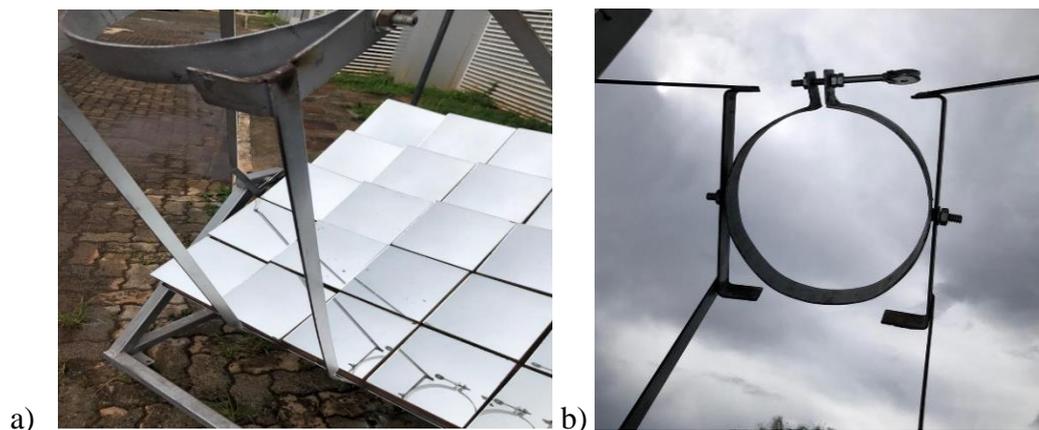


Figura 16 - Suporte para o receptor para encaixe de panela

Na lateral do painel foi fixado um pino com função de indicar a posição do sol, onde quando posicionado de forma correta, não terá sombra em volta do pino, demonstrando estar alinhado perpendicularmente ao plano do painel de espelho (Figura 17).

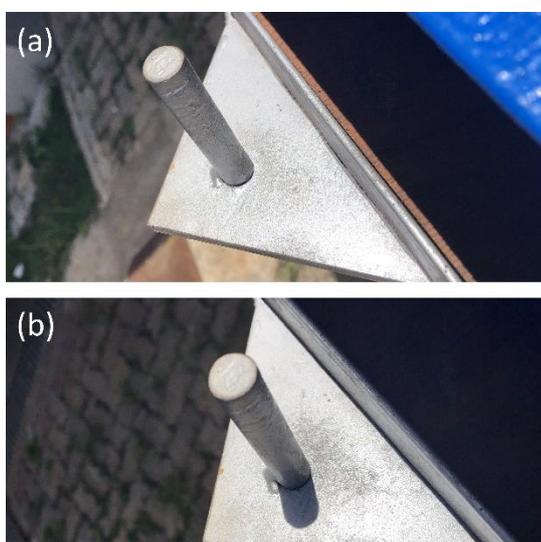


Figura 17 - Pino de indicação da posição do sol. (a) Painel corretamente posicionado (b) Desalinhado a posição do sol

Nas quatro extremidades do painel fixou-se um parafuso no compensado para segurar uma lona (Figura 18). Utilizado para interromper total ou parcial o funcionamento do equipamento ou para preservação do equipamento, quando não estiver sendo utilizado. Esta lona deve ficar presa ao concentrador solar, evitando ser arrastada pelo vento.



Figura 18 - Lona para interromper o funcionamento do equipamento

O segundo concentrador construído contém de 2,5 m², sendo lados de 1,58 m e 64 espelhos quadrados de 0,2 m de lado (Figura 19), sua movimentação também foi feita de forma manual, assim como o concentrador com um metro quadrado de área. Diferente do concentrador solar de menor tamanho, o painel desse concentrador não tem base compensada, os espelhos foram fixados diretamente na base metálica com uma estrutura de parafusos. As demais estruturas foram executadas no mesmo padrão que o concentrador menor, diferenciando apenas as dimensões 2,5 vezes menor.



Figura 19 - Concentrador solar de 2,5 metros quadrado com reator no receptor.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS REATORES

O primeiro reator utilizado é um recipiente de formato circular, de cor preta para absorver o máximo possível a radiação solar, contendo tubos metálicos, conforme Figura 20, utilizados para a circulação do ar dentro do forno, proporcionando uma secagem mais uniforme por meio de ar comprimido. Para combater a condensação da água na parte superior do forno, há 40 furos onde a água evaporada durante a secagem possa sair do circuito, tornando-o um sistema aberto.



Figura 20 -Reator circular com furos na parte superior

Devido a altas temperaturas incidentes no foco, para não haver um carvoejamento direto do bagaço, foi inserido ar comprimido dentro do caldeirão por meio de tubos de aço, conforme Figura 21, os tubos inclinados contêm 63 cm de comprimento cada, com angulação de $112,5^\circ$ e 70° , enquanto o tubo reto contém 25 cm de comprimento, estes tubos foram inseridos a 1 cm da borda do recipiente e fixados por braçadeiras, tanto na parte interna do reator, quanto externa. Um conector em cruz de metal, com pontas de borracha de 3,5m, foi utilizado para unir os tubos, para que o ar comprimido pudesse ser inserido em apenas um local e se distribuir



Figura 21 - Material utilizado na tubulação do reator 01: a) tubos metálicos b) braçadeiras e conector em cruz

A vedação da parte inferior do forno é feita por meio de tampa de mesmo material do recipiente, porca e parafuso sem cabeça que atravessa o reator internamente, para que não haja um deslocamento do fundo, garantindo que não haja perda da biomassa. O fogão em pleno funcionamento pode ser observado na Figura 22.



Figura 22 - Reator em funcionamento

A parte superior do reator contém um furo central, com diâmetro de aproximadamente 2,5 mm, além de furos, conforme Figura 23.



Figura 23 - Tampa do reator 01

Para o segundo reator, utilizou-se um recipiente de mesmo diâmetro e tampa, diferenciando-se apenas pela malha da tela utilizada e fechamento dos furos de passagem de ar comprimido. A circulação de ar se deu pelo sistema rotativo do caldeirão, e, portanto, sem a necessidade de equipamento adicional. Esta rotatividade durante os ensaios foi feita a cada um minuto, com reator girando em torno de seu próprio eixo. Para que não houvesse perda de material na rotatividade, optou-se por alterar as telas usadas internamente, testado inicialmente com tela de 1,7 mm de abertura (Figura 24) e logo após reduzindo a tela para abertura de 0,5 mm (Figura 25). A Figura 26 mostra a parte externa do reator 02.

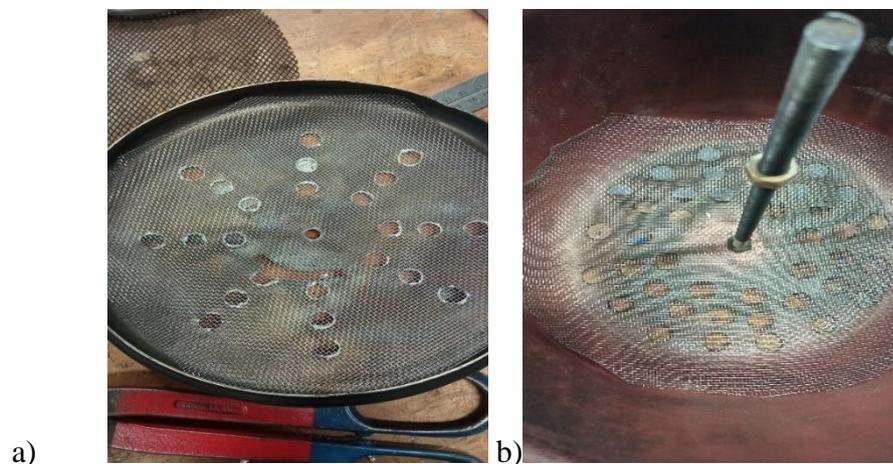


Figura 24 - Reator 02 com malha espaçada em 1,7 mm a) Fundo da tampa b) área interna

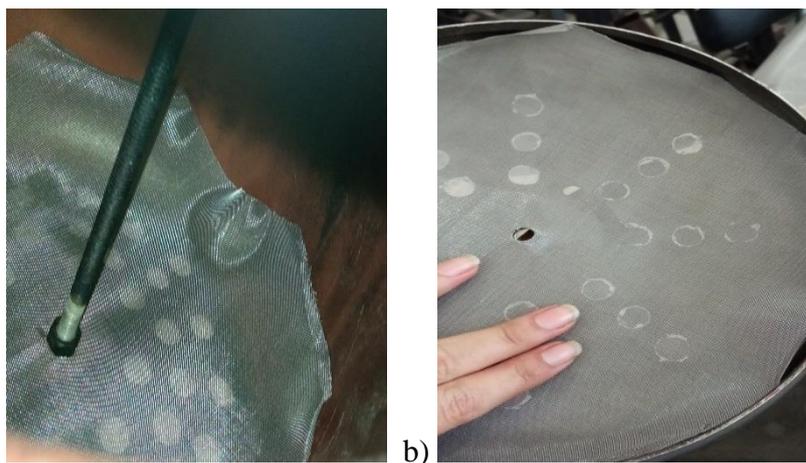


Figura 25 - Reator 02 com malha espaçada em 0,5 mm a) área interna b) Fundo da tampa

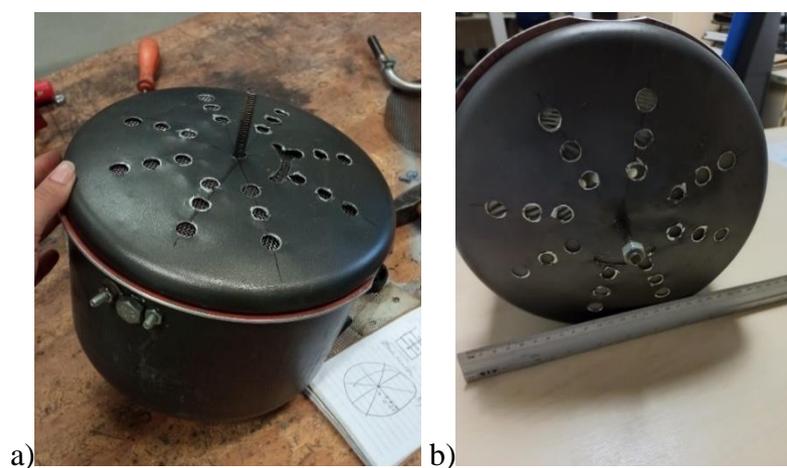


Figura 26 - Parte externa do reator 02

A finalização dos experimentos foi feita com um terceiro reator, onde se percebeu um pouco de condensação, preferiu-se abrir furos no fundo para acelerar o processo de secagem da biomassa (Figura 27).



Figura 27 - Fundo do reator 03

Para caracterização do forno, foi feito um pequeno corte no recipiente com uma serra (Figura 28), higienizado com álcool 70°, e posteriormente analisado em microscópio eletrônico de varredura, marca ZEISS, modelo SIGMA.



Figura 28 - Material para análise microscópica

Por análise microscópica do exterior do forno (Figura 29), foi concluído que o material do reator é fabricado de liga de alumínio com carbono na sua composição (Tabela 2).

Tabela 2 - Análise microscópica do exterior do forno

Elemento	Quantidade %
Carbono	14,55
Oxigênio	1,58
Alumínio	82,79
Argônio	0,25
Ferro	0,61
Níquel	0,22

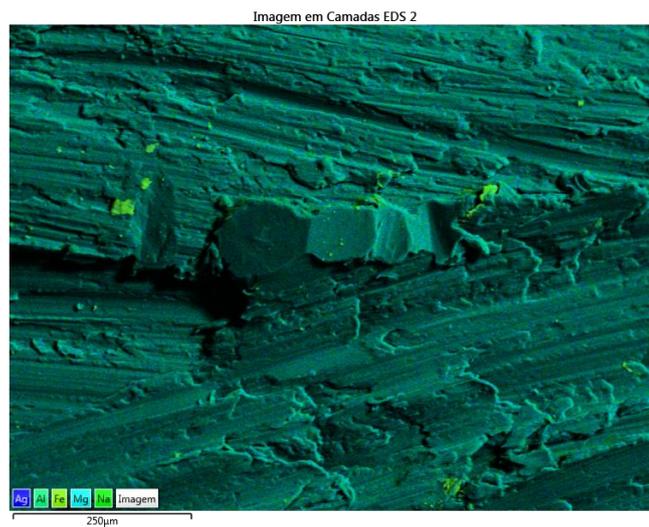


Figura 29 - Análise microscópica do exterior do forno

Análise microscópica também foi feita na lateral, conseguindo obter os dados no interior e exterior do material (Figura 30), encontrando os dados da tabela 3, o material possui alumínio em mais de 80% de sua composição, seguida de carbono e flúor proveniente do politetrafluoretileno, o teflon.

Tabela 3 - Análise microscópica do interior e exterior do forno

Elemento	Quantidade %
Carbono	15,6
Oxigênio	1,46
Flúor	0,54
Mg	0,01
Al	81,35
Fe	0,53
Ag	0,52

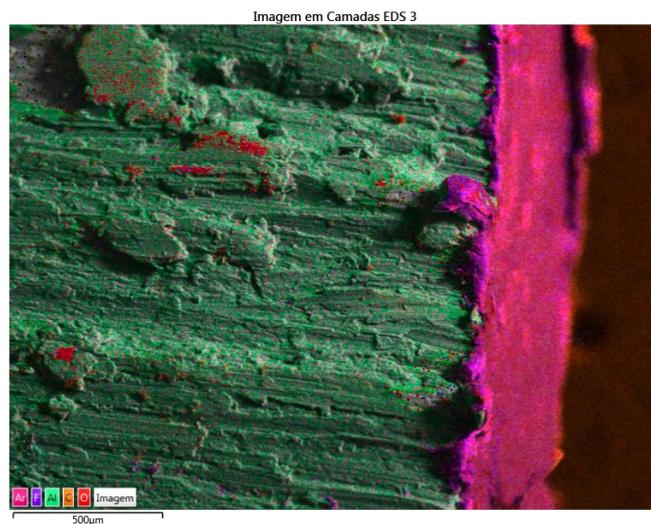


Figura 30 - Análise microscópica interior e exterior do forno

A análise microscópica completa está contida no apêndice A, onde elementos em quantidade muito baixa podem ser desprezados, pela contaminação do material pela atmosfera. Esta análise é de extrema importância para a modelagem numérica, de forma que siga fielmente os parâmetros da modelagem experimental.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM EXPERIMENTAL

Neste capítulo será apresentada a modelagem experimental, iniciando pela validação dos receptores de concentradores solares, onde foi utilizado três modelos de receptores, testados com água para verificar a potência do concentrador e com bagaço da cana-de-açúcar, para testar a secagem do material.

4.1 TESTES DOS CONCENTRADORES

Na modelagem experimental foram feitos testes nos dois concentradores solares, adaptando o reator para atingir os resultados mais eficientes. Ao total utilizaram-se três modelos de reatores (Apêndice B e C), a saber:

- O primeiro com adição de ar comprimido, para diminuir a condensação (Figura 31);
- O segundo adotou-se um sistema rotativo sem adição de ar comprimido (Figura 32 a-b);
- O terceiro continuou com sistema rotativo, mas foram adicionados mais furos ao caldeirão (Figura 32 a-c).



Figura 31 - Primeiro modelo do reator, onde ar comprimido era inserido no tubo de aço



Figura 32 - a) Reator 2 e 3, diferenciando pela abertura da malha das telas. b) Abertura segundo reator c) Abertura terceiro reator.

Para os testes, utilizou-se bagaço da cana-de-açúcar fornecido pela empresa Albioma; a intensidade da radiação foi acompanhada com um solarímetro com registro automático (Instrufiber modelo MES-200) e, a massa inicial e final das amostras, foi aferida em balança semianalítica (Sartorius) a fim de verificar a secagem do material. Quando utilizado o bagaço, após os experimentos, o material ensaiado era conduzido ao Laboratório de Processos Químicos, para ser posto em estufa por 24 horas e verificar a umidade restante do material.

Também foram feitos ensaios utilizando água para verificar a relação tempo e temperatura, acompanhou-se o aquecimento da água utilizando termopar (IncoTerm), onde inicialmente foi utilizado o mesmo reator dos experimentos com bagaço e após iniciar os ensaios com o terceiro modelo, para os ensaios com água, substituiu o reator para um modelo fechado. Nos ensaios de todas as amostras de bagaço e água, a temperatura do caldeirão foi acompanhada por meio de termômetro digital infravermelho.

Antes de iniciar qualquer experimento, a lona deve ser retirada do concentrador e os espelhos calibrados para que o alinhamento levasse a radiação para o foco com precisão, com os espelhos alinhados, a lona era inserida novamente para que o ensaio fosse montado com segurança.

Para modelagem experimental foram realizados 13 experimentos para secagem do bagaço da cana-de-açúcar, utilizando 100g e 200g do material. Também foram feitos ensaios utilizando 500 ou 1000g de água, para aferir a relação tempo e temperatura e observar eficiência do equipamento (Tabela 4). Os 03 primeiros ensaios feitos no concentrador de 1m² foram descartados pois os espelhos ainda estavam sendo alinhados (Apêndice D).

Tabela 4 - Quantidade de experimentos realizados nos concentradores

Concentrador	Quantidade de ensaios	Material
1 m ²	6	Bagaço
2,5 m ²	7	Bagaço
1 m ²	3	Água
2,5 m ²	6	Água

4.2 METODOLOGIA DOS EXPERIMENTOS COM ÁGUA

Iniciando o experimento com água, uma quantidade de material é pesada em balança semianalítica (Figura 33) e transferida para o reator. Com o auxílio de termômetro infravermelho, mede-se temperatura de fundo e lateral do recipiente antes de iniciar a radiação do foco. O concentrador é alinhado ao sol, observado a partir do pino guia, reator é colocado no foco e o solarímetro ligado para aferir a radiação solar no local.

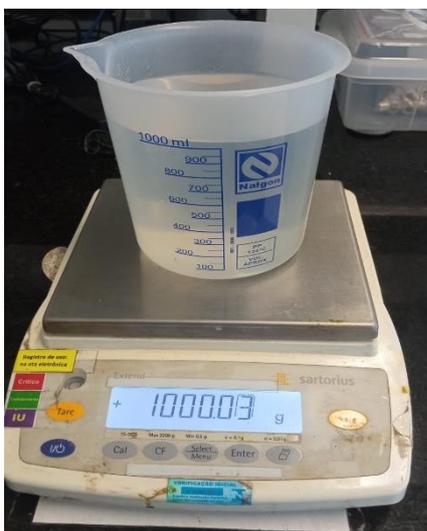


Figura 33 - Pesagem do material para experimento: água potável

Coloca-se o caldeirão no foco e o termopar dentro do líquido para acompanhar o aquecimento da água, retira a lona dos espelhos e inicia o cronômetro. A cada um minuto é aferida a temperatura da água, do recipiente na lateral e no fundo, além da incidência da radiação solar. Quando a temperatura da água alcançar estabilidade e próxima a 100°C, o experimento é encerrado, a lona é recolocada. O reator é retirado do foco e o material é transferido para um becker, onde será verificada sua massa final.

Nos experimentos que utilizaram água, as temperaturas não ultrapassaram a marca 96 °C no recipiente para o concentrador com 1 m² e 108,8 °C para 2,5 m². As baixas temperaturas ocorrem devido ao ponto de ebulição da água, onde o sistema do reator ser aberto, a água que atinge cerca de 98,3°C evapora, mantendo a temperatura interna nesta margem, logo a temperatura externa não consegue elevar devido a transferência de calor por condução.

4.3 METODOLOGIA DOS EXPERIMENTOS COM BAGAÇO

O ensaio com bagaço de cana-de-açúcar inicia com separação da amostra retirada de geladeira do Laboratório de Processos Químicos da Embrapa Agroenergia, são separados a quantidade exata a ser ensaiada, pesando em balança semianalítica (Figura 34) e em seguida alocada no reator. A temperatura de fundo e lateral é aferida, concentrador alinhado e solarímetro aferindo a radiação. O recipiente é posto no fogo, a lona é retirada e inicia o cronômetro.

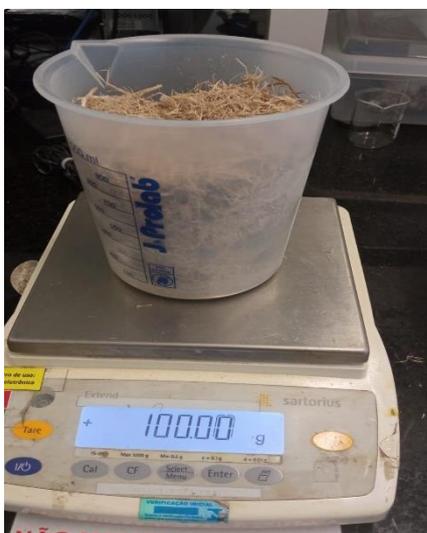


Figura 34 - Pesagem de material para experimento: bagaço de cana-de-açúcar

Nos primeiros testes utilizavam tubulações de borracha (Figura 35), onde necessitou ser substituída após absorver calor e derreter. A nova tubulação do reator possui material em aço (Figura 36), resistindo a altas temperaturas, não interferindo na passagem do ar comprimido para o recipiente.

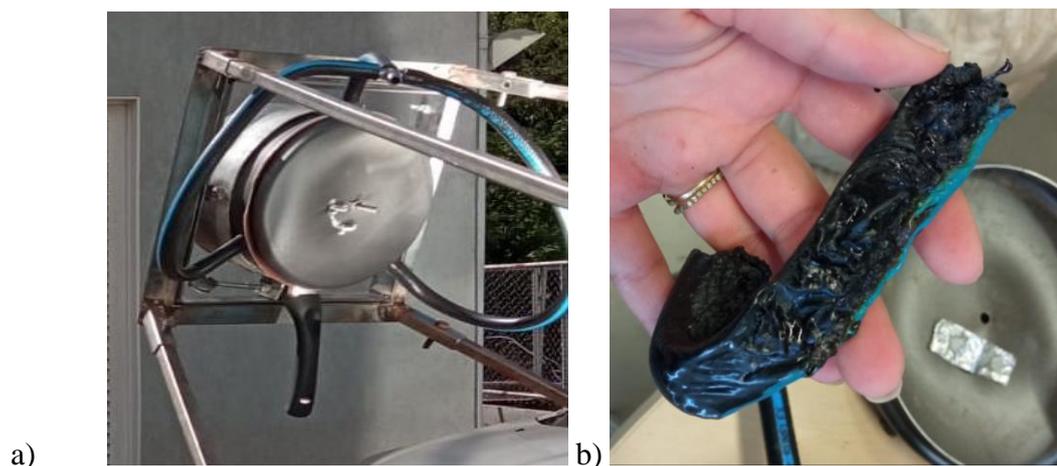


Figura 35 - Tubulação de borracha derretendo em experimento



Figura 36 - Substituição de tubulação de borracha por aço

Quando ensaiados com ar comprimido no concentrador de 1 m², em regime de bateladas, as aferições são feitas a cada 15 minutos, encerrando após 2 horas do início, pois foi constatado com base nos resultados dos experimentos que após este tempo, a massa da amostra estabilizava. No concentrador de 2,5 m², utilizando ar comprimido ou sistema rotativo, as aferições são a cada 1 minuto e encerradas logo após a fumaça cessar para que não haja torrefação da amostra. As temperaturas aferidas ao fundo do reator, quando expostas no concentrador de 1 m² chegaram a 180,2 °C, enquanto concentradores de 2,5 m², as temperaturas alcançaram 365,3 °C. Após o encerramento, as amostras ensaiadas são pesadas e colocadas em estufa em regime over night e pesadas novamente após 24 horas, verificando a eficiência da secagem.

As temperaturas aferidas no foco não dependem apenas da radiação incidida nos espelhos, o alinhamento dos espelhos que apontem a radiação para o foco é essencial. O primeiro teste feito no concentrador solar de 2,5 metros quadrados, as temperaturas chegaram a 170,5°C, devido ao desalinhamento dos espelhos (Figura 37).



Figura 37 - Espelhos desalinhados

Após a secagem das amostras de biomassa foram realizados ensaios do poder calorífico, da quantificação de CNH (carbono, nitrogênio e hidrogênio), assim como os termogravimétricos. Para determinar a calorimetria utilizou do equipamento calorímetro com banho de refrigeração, marca IKA, modelo C-2000 (Figura 38). Em amostra de biomassa seca em concentrador solar com 1 m², o poder calorimétrico gira em torno de 17,57 MJ/Kg e desvio padrão 0,1727. Contudo em amostra ensaiada em concentrador 2,5 m², média em torno de 17,94 MJ/Kg e desvio padrão 0,9182 (Apêndice E). Demonstrando que o quanto maior a área do concentrador, maior o desvio padrão do poder calorífico da amostra, explicitando sua característica de secagem homogênea.



Figura 38 - Calorímetro com banho de refrigeração

Também foi ensaiada a quantificação das porcentagens do CHN, conforme resultados da Tabela 5, com a média dos resultados para cada área do concentrador. A taxa de umidade é medida controlando a variação da massa do bagaço, utilizando massa úmida do material após o ensaio e massa seca do material exposto a 105°C em estufa por 24 horas, por meio da equação abaixo:

$$X_{bs} = \frac{Mu - Ms}{Ms} \quad \text{eq. 03}$$

Tabela 5 - Resultados dos ensaios CHN

Ensaio CNH			
Concentrador	C%	H%	N%
1m ²	44,63	5,98	0,287
2,5m ²	40	2,23	0,54

A quantidade de carbono para concentrador 2,5 m² contém desvio padrão 2,94, enquanto para concentrador 1 m² o desvio padrão 0.97. O desvio padrão observado na tabela acima ocorre devido as temperaturas mais baixas do concentrador de 1m², que proporciona uma secagem mais uniforme devido ao maior tempo de cozimento para obter a mesma perda de massa.

Contudo, diante dos resultados do ensaio de CNH, constata-se que as taxas de hidrogênio das amostras diminuíram 62,7%, enquanto o carbono diminuiu 10%, demonstrando um aumento no valor energético, devido as ligações de carbono-hidrogênio terem baixa energia, quando comparado as ligações carbono-carbono, logo, quando maior a quantidade de hidrogênio, menor o valor energético do material (MCKENDRY, 2002). Em relação ao nitrogênio, os teores encontrados são muito baixos, não afetando de forma significativa o valor energético.

O método termogravimétrico (TGA) analisa o processo de decomposição térmica da biomassa durante um período, variando a temperatura em atmosfera de nitrogênio, aquecendo até atingir 800°C. A partir deste aquecimento é possível encontrar o teor de umidade, teor de materiais voláteis, teor de cinzas, teor de carbono fixo e teor de cinzas secas. O teor de umidade determina a quantidade de água na amostra e quanto maior a umidade, menor o poder calorífico; o teor volátil é a facilidade de queima de um material, onde volatiliza a massa do combustível durante o aquecimento, e, portanto, quanto maior o teor de substâncias voláteis, mais fácil ocorre a queima do material (ARANTES, 2014).

O carbono fixo é oposto aos teores de cinza e materiais voláteis, ou seja, o componente que produz energia durante a pirólise, quando há composição de alto teor num determinado material, sua queima ocorre de forma lenta, proporcionando maior tempo de consumo. As cinzas definem a viabilidade da biomassa, são os produtos inorgânicos oxidados resultantes da combustão dos componentes orgânicos que dificulta o processo de conversão termoquímica, aumentando incrustações, corrosão nos reatores e diminuindo a energia do combustível. (ARANTES, 2014).

Tabela 6 - Experimentos TGA

Concentrador	Umidade %	Volátil %	Carbono fixo %	Cinza %	Cinza seca %
1 m ²	3,78	79,44	12,74	4,05	4,21
2,5 m ²	2,80	75,71	17,685	3,8	3,91

Diante dos resultados obtidos (Tabela 6), ensaios em maiores temperaturas permitiu que o reator liberasse de forma mais eficiente a umidade do material e que mesmo com volatilidade mais baixa, os ensaios em concentrador maior possuem uma queima mais lenta, logo, um melhor aproveitamento de biomassa, tornando o bagaço mais eficiente para reaproveitamento e diminuição de resíduos.

CAPÍTULO 5

MODELAGEM NUMÉRICA

Neste capítulo é descrita a modelagem numérica do caldeirão para obtenção de tensões, deformações e deslocamentos por meio do software *Abaqus*. O recipiente empregado na fase experimental foi modelado usando parâmetros externos semelhantes e interações entre os materiais. Para a modelagem foram utilizados 2.989 elementos do tipo *shell* triangular de 3 nós com 6 graus de liberdade para cada nó, sendo o apropriado para representar elementos planos ou curvos com espessuras finas. Os resultados encontrados na simulação de tensão foram feitas em vários pontos dentro da fase transitória, onde em cada ponto a tensão térmica é calculada, determinando o valor de tensão máxima.

5.1 MODELAGEM DO CALDEIRÃO

Para iniciar os testes numéricos, utilizou da modelagem do caldeirão utilizado nos ensaios experimentais, revestido em alumínio com antiaderente Starflon T1 interno e externo, para que haja cozimento uniforme. Conforme observado na análise microscópica, vide tabela 2 e 3, a composição do material tem predominância do elemento alumínio, protegido por uma tela de malha 0,5 mm para não haver perda de biomassa (Figura 25). As especificações do caldeirão estão contidas na Quadro 1.

Quadro 1 – Especificações do caldeirão

Diâmetro	22 cm
Espessura paredes	1,8 mm
Tela da malha	0,5 mm
Densidade	270 kg/m ³
Condutividade	210 W/(m°C)
Calor específico	910 (kg°C)

5.1.1 Malha de elementos e estados para análise

Inicialmente, foi criada uma solução através do estado estacionário dentro da biblioteca do ABAQUS “*steady state*”, impulsionada por uma segunda análise com uma etapa transitória “*transiente step*”, incluindo a temperatura ambiente do recipiente simulado. O elemento DC3D10, 10-node *quadratic heat transfer tetrahedron*, da biblioteca do *Abaqus* foi utilizado na malha de elementos finitos. Nas Figuras 39 a 42, temos o receptor, na forma de panela com furos e sua malha de elementos finitos em várias vistas.

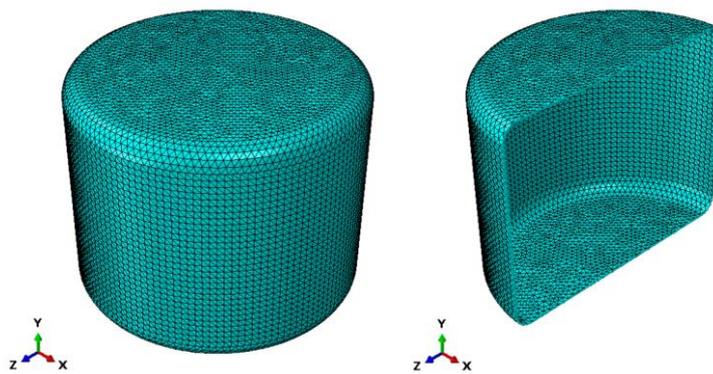


Figura 39 – a) Malha de EF cheia; b) Malha ½ simetria de EF

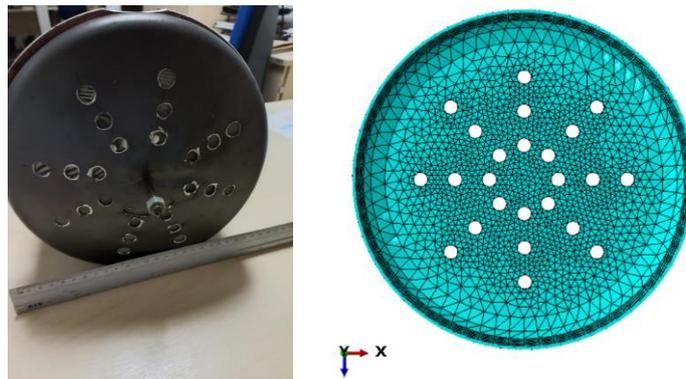


Figura 40 - Tampa da panela modelada com 24 furos de 10mm

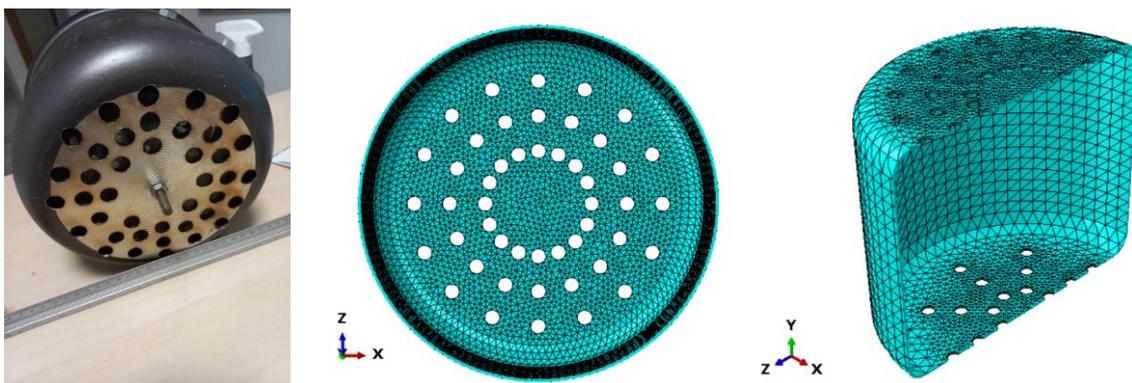


Figura 41 - Modelagem do fundo da panela com 48 furos de 10mm

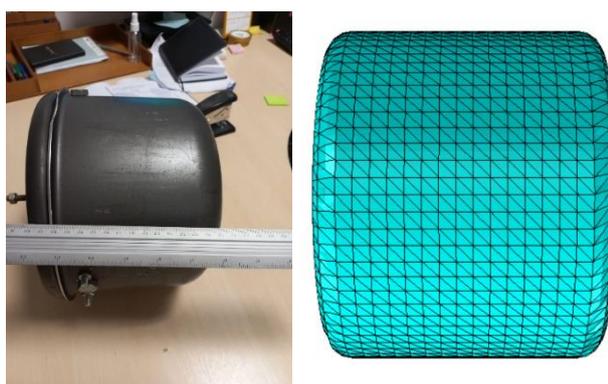


Figura 42 - Panela tipo caldeirão modelado com elemento triangular no ABAQUS

A partir da modelagem e obtenção dos dados tensão sobre o material, estipula-se vários cenários de carregamentos, permitindo expor a função de densidade probabilística do painel, que representa a frequência de ocorrência em ciclos. Analisando se o receptor é resistente a altas temperaturas e se haverá falha no gradiente de alta temperatura por tensão térmica. Além destes, deve-se analisar a resistência do painel, quando expostos a radiação, para que não haja perdas de calor. Possibilitando identificar soluções que possam reduzir as tensões térmicas e, caso necessário, a mudança de algum material.

5.1.2 Critério de análise e malha de elementos finitos

Neste trabalho apresenta-se um modelo de elementos finitos elaborado com auxílio do software *Abaqus* para estimativa das tensões na parede do recipiente objeto de análise. Para simulação de temperatura utilizou o algoritmo Heat Transfer (Transient). A modelagem deste tipo de

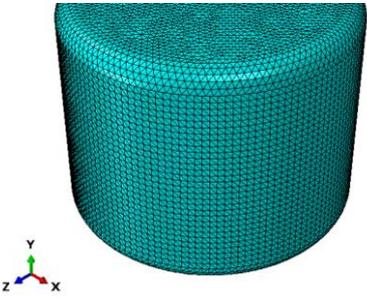
estrutura é um transiente com não linearidade, que envolve uma simulação do aumento da temperatura no tempo. Neste caso, a resposta força vs. deslocamento mostra-se, uma rigidez negativa e a estrutura deve liberar energia de deformação para permanecer em equilíbrio. Assim, uma das soluções disponíveis no *Abaqus* é a utilização de um processo incremental/iterativo.

Em problemas de não linearidade, como mudança de temperatura no elemento no tempo, a análise pode ser realizada partindo da configuração inicial da estrutura e determinando a temperatura inicial. Para posteriormente determinar uma função de fluxo de calor com aumento da temperatura no tempo, que resulta em tensões e esforços à medida que a temperatura é aumentada. Em razão da não linearidade da resposta é necessário utilizar um procedimento iterativo onde incrementos iterativos de temperatura por função de amplitude seja aplicada, a fim de definir o caminho de equilíbrio do modelo. Nesse processo, em cada passo da busca pela solução, incrementos de força são aplicados e os respectivos deslocamentos são calculados pelas relações descritas a partir das equações de equilíbrio por meio do método de Newton Raphson.

Portanto, pelo algoritmo de Newton Raphson no *Abaqus*, o tamanho do incremento inicial foi definido. Logo, para iniciar a análise, deve-se fornecer um incremento inicial que é equivalente a uma fração da temperatura, usado neste trabalho o valor de 0,025. Em seguida, os incrementos seguintes são ajustados automaticamente pelo *Abaqus*, aumentando ou diminuindo, dependendo do número de iterações realizadas para convergência do incremento, assim, quanto menor a fração do incremento inicial usado, maior será a possibilidade de convergência, porém, mais interações serão realizadas.

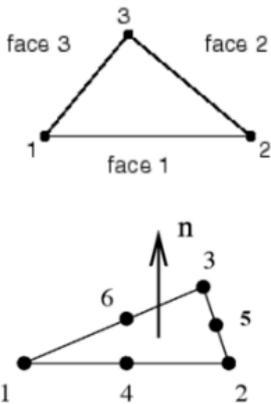
O quadro 2 mostra os detalhes da discretização dos elementos finitos triangulares, bem como, o comprimento dos elementos com algoritmo de malha automática do *Abaqus*.

Quadro 2 - Detalhe de discretização da malha em MEF

Tipo de Elemento	Discretização do recipiente	Características da malha
Shell S3:A-3		<p>A zona curva da panela foi utilizado mais elementos com comprimento de 5,0mm, com uso de malha automática do ABAQUS, através da ferramenta Global Seeds. Nas demais faces da panela foi utilizado elemento com tamanho aproximando de 7,50 mm com controle global do tamanho de 0,10 mm, resultando em um total de 2.989 elementos.</p>

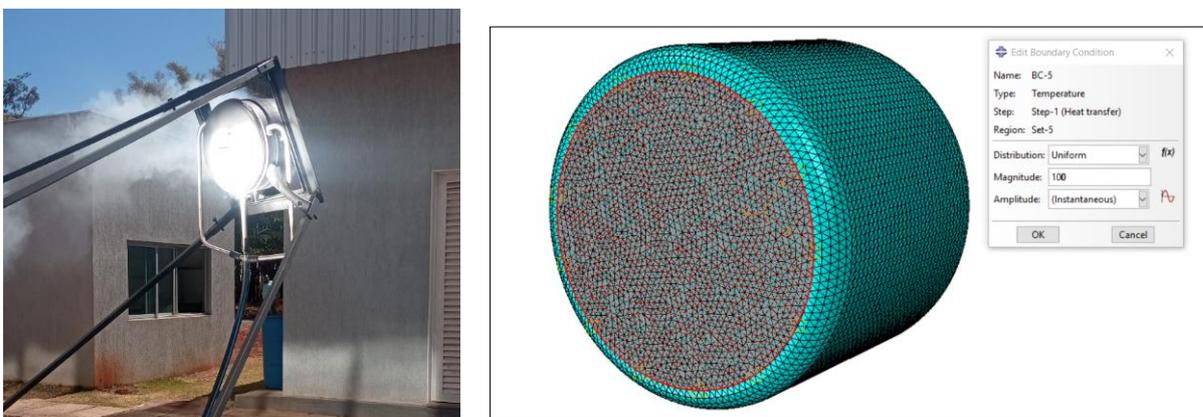
A seleção dos elementos finitos pré-definidos contidos na biblioteca do software *Abaqus*, apresentados no Quadro 2 com a discretização do modelo, foi realizada com base em alguns aspectos, que englobam o comportamento do elemento, esforço computacional, número de graus de liberdade e em estudos presentes na revisão da literatura. O quadro 3 apresenta os detalhes dos elementos adotados.

Quadro 3 - Detalhe dos elementos utilizados na geração da malha da biblioteca ABAQUS

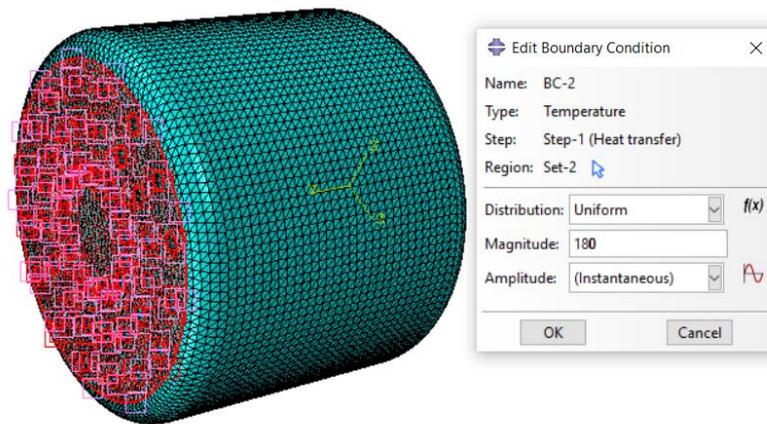
Nome do Elemento	Tipo de Elemento	Definição do elemento
Shell S3:A-3		<p>Shell triangular de 3 nós de uso geral. Possui 3 nós com 6 graus de liberdade por nós (translações nas direções x, y e z e rotações em torno dos eixos). É apropriado para representar elementos planos ou curvos com espessuras finas.</p>

5.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO DA MODELAGEM

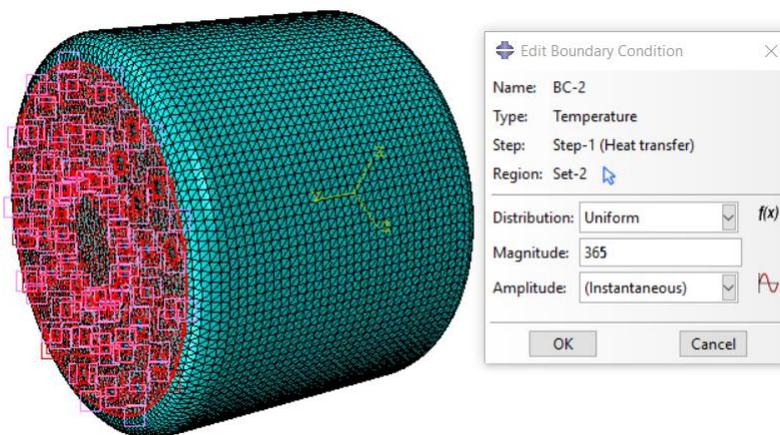
A partir da diferença da temperatura ambiente e temperatura posterior no receptor, determinou-se o campo de tensões gerados no corpo devido a esta variação, para tal utilizou do programa *Abaqus* para solucionar este problema termo-elástico. Logo, a solução desse problema envolve a execução dos mesmos passos do problema térmico, apenas modificando o tipo de análise com o passo “*Coupled temp-displacement*” incluindo as temperaturas externa e interna através das condições de contorno (BCs) usando na biblioteca do ABAQUS o “*Type: Temperature*” e também recriando uma nova malha de elementos “*Mesh com Element Type: Family: Coupled Temperature-Displacement, Geometric Order: Linear*”. A Figura 43 mostra as condições de contorno aplicadas ao modelo, considerando a temperatura conhecida na face externa da panela. Foram utilizados como condições de contorno as temperaturas máximas encontradas nos experimentos utilizando água, denominado de RES1 (Figura 43a), utilizando o concentrador com 1m², denominado de RES2 (Figura 43b) e 2,5m², denominado de RES3 (Figura 43c).



(a) Condições de contorno da temperatura considerando água no recipiente com $T = 100^{\circ}\text{C}$



(b) Condições de contorno da temperatura considerando bagaço de cana no recipiente da panela com $T = 180^{\circ}\text{C}$



(c) Condições de contorno da temperatura considerando bagaço de cana no recipiente da panela com $T = 365^{\circ}\text{C}$

Figura 43 - Aplicação da condição de contorno no modelo com a temperatura obtida em graus célsius. As condições de contorno utilizando as temperaturas máximas analisaram o fluxo de temperatura no foco, onde seis pontos foram nomeados de A a F, distribuídos no foco, face e laterais do receptor.

CAPÍTULO 6

ANÁLISES E RESULTADOS

Este capítulo aborda as análises e resultados dos experimentos utilizados como condições de contorno na modelagem numérica por meio do software *Abaqus*. Foram escolhidos três resultados utilizando água e bagaço da cana-de-açúcar, com concentradores solares de 1m² e 2,5m², onde por meio destes apresentaram os gradientes de temperatura no receptor e possibilitou as análises de distribuição de tensão, deformações e deslocamentos na estrutura.

6.1 ANÁLISES DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios do concentrador de 1m² em regime de batelada (figura 44), o recipiente chegou no fundo a 110°C antes de atingir 10 minutos, onde com auxílio de solarímetro, a radiação foi medida e estava em torno de 1000 W/m² e sua temperatura lateral, sendo medida próximo ao ponto E, encontrava-se em torno de 50°C

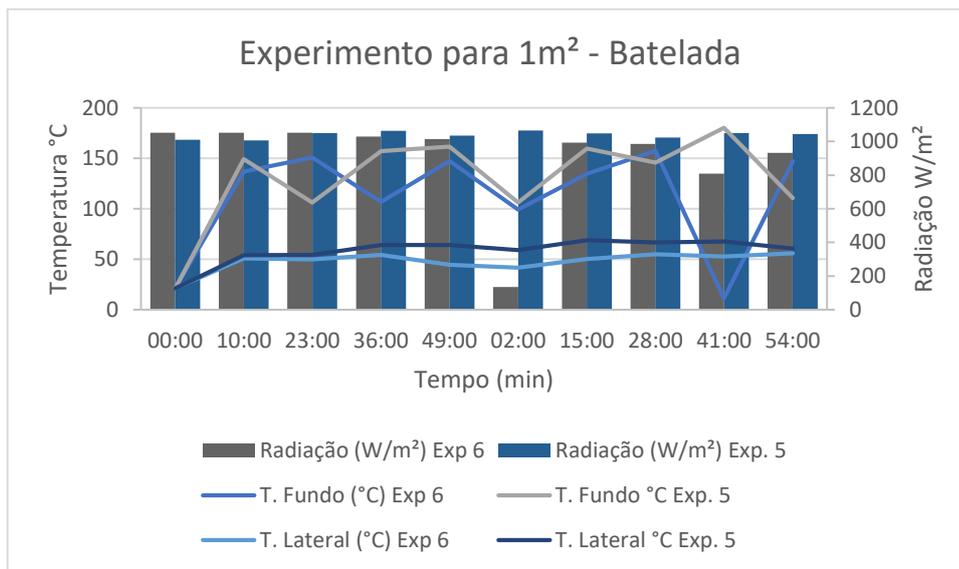


Figura 44 - Resultados experimentais para ensaios nos concentradores de 1,0 m², em sistema de batelada

Os ensaios do concentrador de 2,5m² em regime de batelada, o recipiente chegou no fundo a 110°C quando próximo a 32 segundos, e sua temperatura lateral de 32,5°C no ponto E (Figura 45).

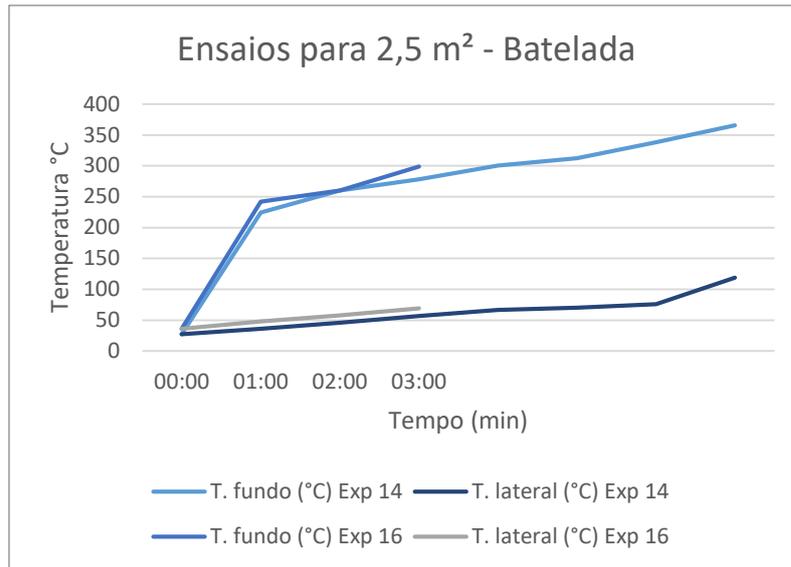


Figura 45 - Resultados experimentais para ensaios nos concentradores de 2,5 m², em sistema de batelada

Em concentradores de 2,5 m² no sistema rotativo, quando alcançado 110°C no caldeirão obteve variação de 21,22 segundos a 32,03 segundos, radiação em torno de 1000 W/m² e sua temperatura lateral, sendo medida próximo ao ponto E, encontrava-se em torno de 36°C (Figura 46).

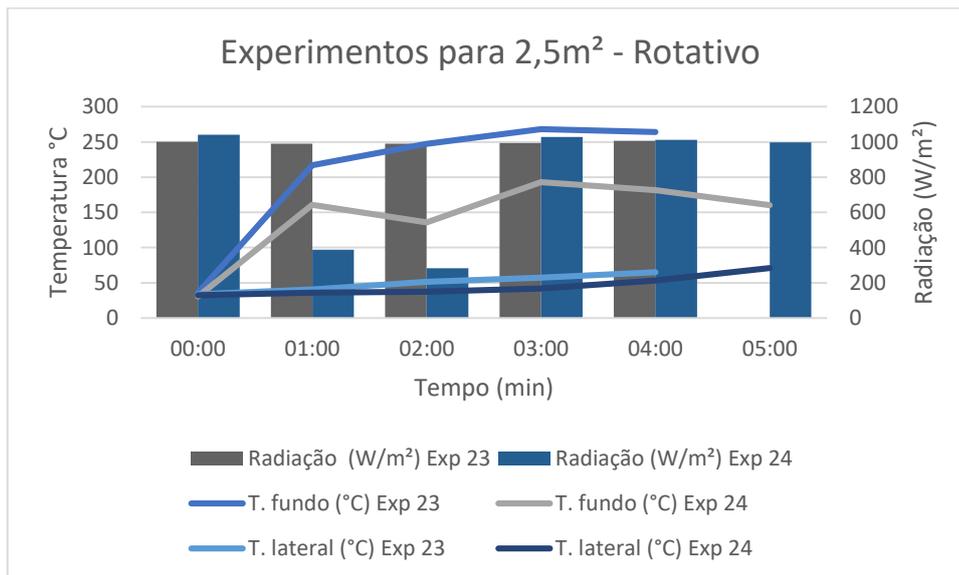


Figura 46 - Resultados experimentais para ensaios nos concentradores de 2,5 m², em sistema rotativo

Esses resultados diferem-se por o concentrador de 1m² em regime de batelada convergir menos radiação devido sua área ser 2,5 vezes menor que o outro concentrador, necessitando de um tempo maior para atingir uma determinada temperatura, contudo seu limite de temperatura

máxima durante os ensaios foi de 180,2 °C, já no concentrador de 2,5m² as temperaturas atingiram 365,3°C no recipiente.

6.2 ANÁLISE DA MODELAGEM

Utilizando na modelagem os resultados dos experimentos 05 para RES2 e 14 para RES3, enquanto que para o RES1, com massa de g, usou o valor máximo que a água atingiria antes de chegar ao ponto de ebulição, 100°C, obteve-se as temperaturas em função do tempo, monitorando 6 pontos do reator, nomeados de A a F, para observar a forma que calor propaga no material. O RES1 alcançou temperatura de 100°C em 10 segundos, RES2 alcançou 180°C em 41 minutos e RES3 alcançou temperatura de 365°C em 18 minutos, os resultados obtidos (apêndice f) foram compilados em gráficos para melhor visibilidade (Figura 44, 46 e 48).

Obtivemos as visualizações gráficas e as distribuições de temperatura. Na Figura 48, 47 e 49 é possível observar a temperatura de condução por meio do gradiente de cores, proveniente da propagação do calor, onde a face apontada para o concentrador recebe a radiação solar e aquece todo o corpo do sólido de forma gradativa.

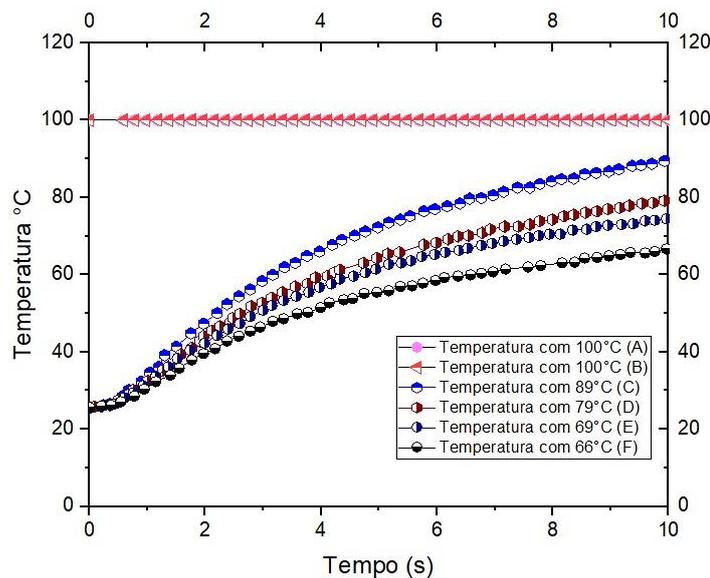


Figura 47 - Propagação da temperatura no tempo em RES1

Os pontos de controle em RES1 (Figura 48) foram determinados para a distribuição da temperatura após 10 segundos na superfície do forno. Onde o ponto A e B possui temperatura constante no tempo, 100°C, recebendo o calor da radiação no foco, e nos demais pontos iniciam na temperatura ambiente referência e amplia no tempo durante o calor transitório de

transferência, em direção contrária a face exposta a radiação. Portanto, o gradiente de temperatura altera no tempo no período transiente, atingindo 58°C no ponto F.

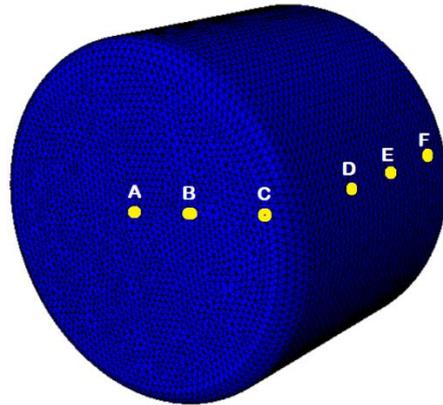


Figura 48 - Ponto de controle para determinação da distribuição de temperatura na superfície do forno, em RES1 a 100°C, utilizando água no recipiente

O modelo de reator utilizado em RES1 não apresenta pontos de descontinuidade, isto pode ser confirmado pela constância na temperatura no ponto A e B, onde houve distribuição uniforme de temperatura por toda a face, durante todo o tempo do ensaio. Um resultado esperado pois o experimento realizado não alcança altas temperaturas, já que estava sendo utilizado água, mas principalmente por não apresentar furos na estrutura, diferente dos modelos posteriores, pois furos são um tipo comum de descontinuidade enfraquece a estrutura.

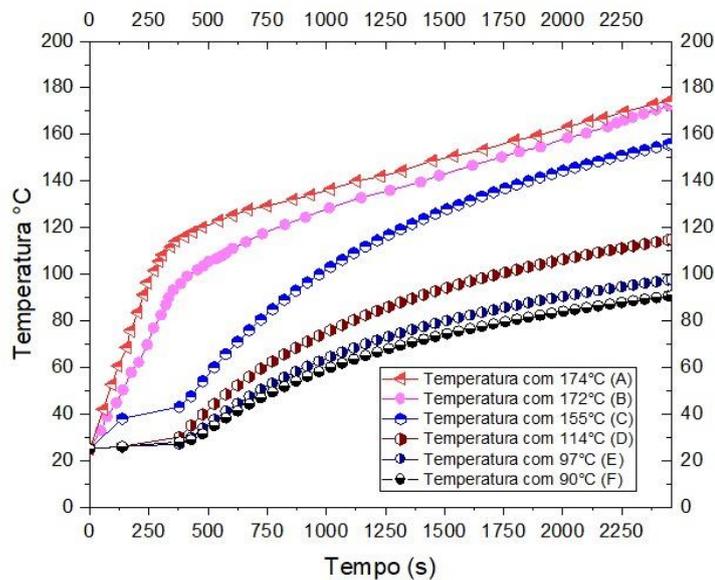


Figura 49 - Propagação da temperatura no tempo em RES2

Os pontos de controle em RES2 (Figura 50) foram determinados para a distribuição da temperatura após 2460 segundos na superfície do forno. Onde o ponto A e B em 300 segundos atingiram 120°C, enquanto para atingir a temperatura máxima, de 180°C, necessitou em torno de 2210 segundos, os demais pontos aumentaram a temperatura de forma mais gradual, atingindo 90°C no ponto F, ao fim do tempo.

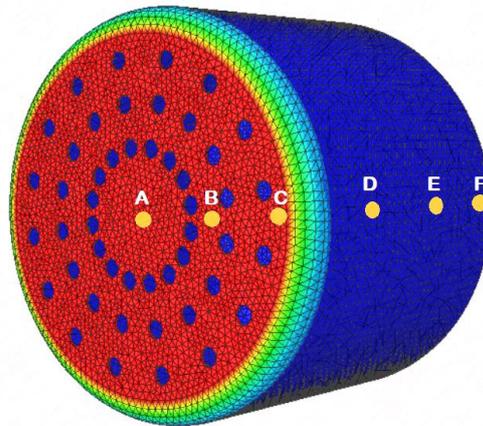


Figura 50 - Ponto de controle para determinação da distribuição de temperatura na superfície do forno, em RES2 a 180°C, utilizando bagaço no recipiente

O aumento gradual de temperatura dos pontos fora do centro do reator é advindo da condução térmica do material, diferente do que ocorre no centro, onde a face está exposta a radiação.

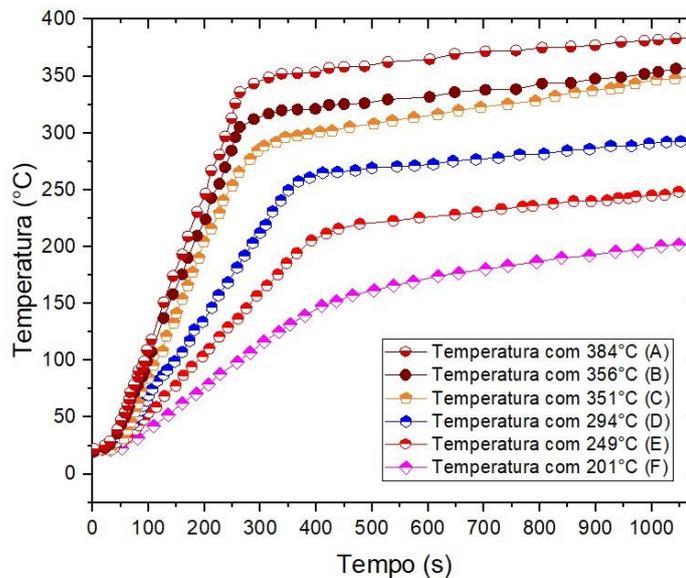


Figura 51 - Propagação da temperatura no tempo em RES3

Os pontos de controle em RES3 (Figura 52) foram determinados para a distribuição da temperatura após 1080 segundos na superfície do forno. Onde as temperaturas tiveram aumento

rápido nos primeiros 300 segundos, variando de 350°C no ponto A a 125°C no ponto F, os fim do tempo, o ponto F atingiu temperatura máxima de 204°C.

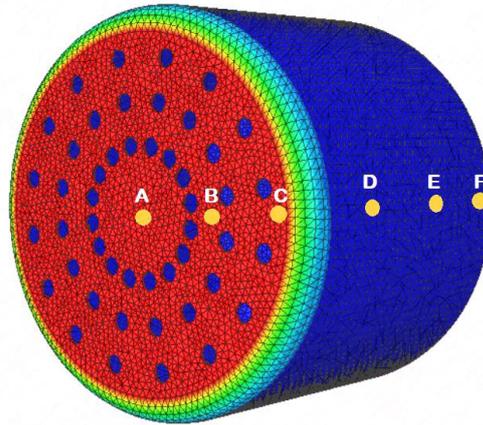


Figura 52 - Ponto de controle para determinação da distribuição de temperatura na superfície do forno, em RES3 a 365°C, utilizando bagaço no recipiente

Em RES3, a alta temperatura conduziu o fluxo de calor nos pontos analisados a desenharem um padrão de distribuição semelhante, chegando a um pico nos mesmos 300 segundos que RES2, porém mantendo uma variação menor na temperatura até o fim do ensaio.

No estado transiente, há distribuição dos fluxos das reações, onde a temperatura é conduzida para as laterais do caldeirão através do fluxo de calor nas laterais, conforme Figura 48, 46, e 47, em todo estado transiente, até que as laterais e fundo atinjam diferença de temperatura mínima na superfície, atingindo o estado estacionário. Conforme observado, as temperaturas no recipiente diminuem quando o ponto se afasta do foco de radiação. Os gradientes de temperatura encontrados são usados como carga para simulação de tensão, utilizando a unidade MPa (Figura 53 e 54).

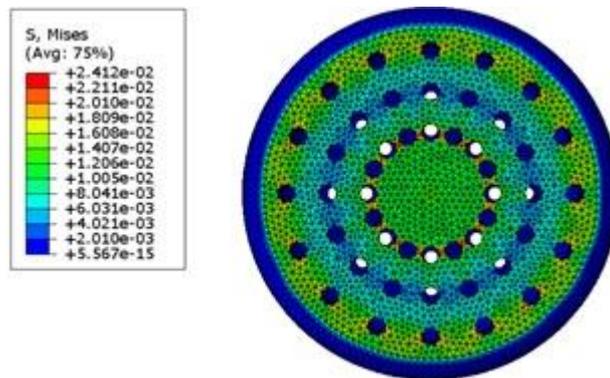


Figura 53 - Tensões devido a distribuição de temperatura quando aplicado 180°C

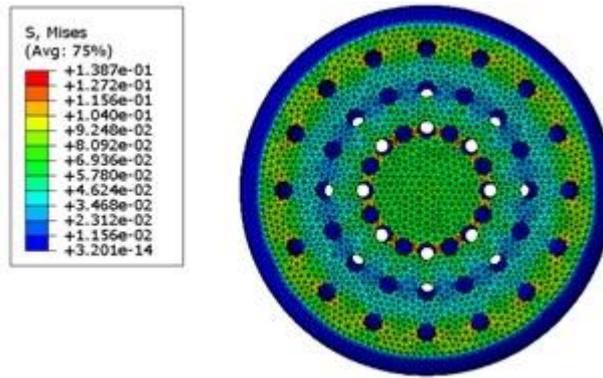


Figura 54 – Tensões devido a distribuição de temperatura quando aplicado 365 °C

Note-se que a tensão máxima ocorre próximo aos furos que contém médio diâmetro quando comparados aos demais furos, menor espaçamento entre eles e estão localizados no centro do foco, seguido da região de furos mais externos, que pode ser explicado pelo maior dimensão do furo, afastamento entre eles, por fim os furos localizados entre os de maiores tensão, que contém menor diâmetro e maior afastamento entre eles.

Diante das altas temperaturas, deformações foram encontradas na face, onde os furos do centro, região de maior tensão sofreu um encurtamento, enquanto que a região de furos mais externas sofreu alongamento, como mostrado na Figura 55, na unidade mm.

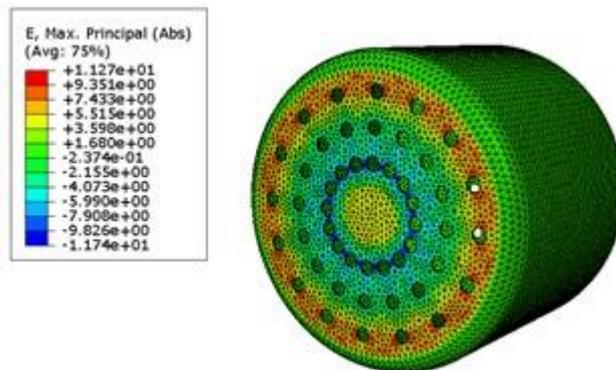


Figura 55 - Deformação principal devido a distribuição de temperatura de 365°C em vista isométrica

Estas deformações de encurtamento ocorridas na região que recebe maior temperatura desequilibra a estrutura, onde sofre reação de alongamento para que a estrutura volte ao equilíbrio. Este padrão é visto nas deformações na distribuição de temperatura a 180°C, contudo de forma mais branda, como já esperado, devido a menores temperaturas e consequentemente, menores tensões (Figura 56).

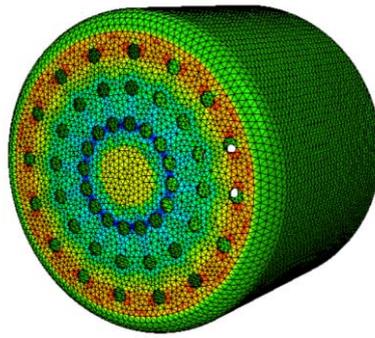


Figura 56 - Deformação principal devido a distribuição de temperatura de 100 °C em vista isométrica

O deslocamento máximo do reator, encontrado na unidade mm, é direcionado do centro do recipiente, onde recebe radiação direta e diminui ao passo que se afasta do núcleo. Ou seja, a região mais externa contém deslocamento próximo a zero, demonstrando estabilidade na posição do ponto (Figura 57).

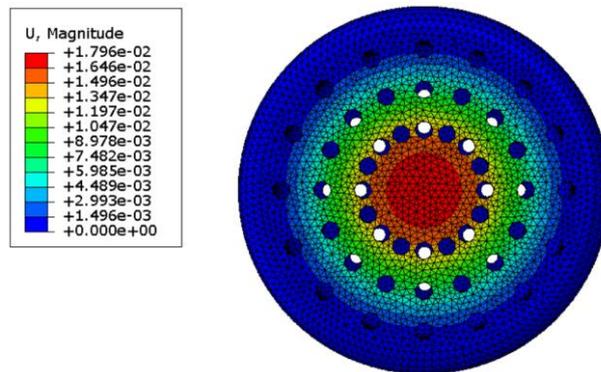


Figura 57 - Deslocamento máximo devido a distribuição de Temperatura

Comparado a análise dos resultados encontrados na modelagem numérica com os experimentos realizados nos concentradores, utilizando a análise experimental para suporte na simulação numérica, onde o carregamento térmico mais crítico não é conhecido antes da simulação, a mesma deve ser realizada em vários pontos da fase transitória, a fim de obter os valores de tensão.

Quadro 4 - Resultados obtidos na modelagem numérica

Resultados obtidos na modelagem	RES3
Temperatura máxima no ponto B (°C)	356
Temperatura máxima no ponto C (°C)	351
Temperatura máxima no ponto D (°C)	294
Temperatura máxima no ponto E (°C)	249
Temperatura máxima no ponto F (°C)	201
Tempo (s)	1100
Tensão máxima (MPa)	0,1387
Deslocamento máximo (mm)	11,27
Deformação máxima (mm)	0,01786

Com os resultados encontrados nos pontos A a F (quadro 4), observou-se que, quando expostos a maior temperatura, as tensões máxima passaram de 0,02412 MPa para 0,1387 MPa, ou seja, quando a temperatura foi dobrada, a tensão aumentou seis vezes mais.

A tensão de von Mises contém como critério a deformação plástica, quando atinge o valor limite de escoamento, levando a perda de resistência mecânica devido a baixa rigidez, escoamento localizado e global, além de outras falhas, como fluência, trincas e fratura por fadiga. A redução da tensão diminui os custos de substituição dos componentes danificados e aumenta a vida à fadiga da estrutura. Para que o haja retirada da umidade de forma eficiente do material utilizado na secagem, o reator necessita de uma estrutura com descontinuidades. Contudo, as bordas das descontinuidades possui alta concentração de tensão, demonstrando que a forma e orientações destes recortes, juntamente com outros parâmetros, como o foco de recepção de temperatura ser no centro do objeto, afetam a distribuições de tensões.

A partir das tensões, deformações são encontradas no objeto que são determinadas pelas tensões, visto que o corpo tende a se estabilizar, ocorrendo encurtamento ou alongamento na estrutura de forma que encontre o equilíbrio. Quanto aos deslocamentos simulados nos pontos, obtiveram-se valores significativos próximos ao núcleo, enquanto que nos pontos mais externos aproximam de zero, ou seja, o deslocamento ocorre no sentido de minimizar a perturbação ocasionada pela variação da temperatura.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho tratou de modelagem e análise de forma experimental e numérica de um receptor para concentradores solares usado no processo de secagem, torrefação e carvoejamento da cana-de-açúcar, tendo sofrido variação de temperatura e propagado o fluxo de calor. Para tal, foram construídos modelos físicos de concentradores solares com área de 1,0 m² e 2,5 m², testando a variação da temperatura no foco, onde os dados adquiridos foram utilizados como condições de contorno para realizar os testes na modelagem numérica por meio do Método dos Elementos Finitos e o software *Abaqus*. Podendo-se chegar as seguintes conclusões: as tensões, deformações e deslocamentos provenientes da exposição do receptor as variações de temperaturas, buscando encontrar uma relação entre a área do concentrador solar e temperatura alcançada no reator. Nas seções a seguir, apresentamos as conclusões gerais e específicas do trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

7.1 CONCLUSÕES GERAIS

Utilizando os procedimentos experimentais, um modelo computacional foi desenvolvido para verificar e atestar a eficiência do método e observar os resultados, por meio do software *Abaqus*. Neste modelo avaliou o modelo desenvolvido através do método dos elementos finitos apresentou resultado satisfatório, visto que foi concluído que a variação da temperatura aplicada na face direcionada ao foco irá determinar o fluxo das reações de calor, pois ao comparar a aplicação distintas de temperatura, obteve fluxos diferentes.

A interação numérica com o MEF é fundamental na análise de estruturas, pois permite modelar com precisão o seu comportamento mecânico sob diferentes condições de carga. Este trabalho tratou de carregamento térmico ao longo da estrutura por meio de radiação térmica, variações de calor, fluxos de calor e transferência de calor por convecção, onde com o modelo discretizado, obteve-se informações detalhadas sobre a resposta estrutural na distribuição de temperatura, ou seja, encontrando os possíveis pontos frágeis da estrutura., pontos de maior temperatura, gradientes térmicos e áreas de possível falha.

7.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

Foram construídos dois modelos de concentradores solares com área de 1 m² e 2,5 m², onde na fase experimental usou regime de bateladas ou rotativo, com espelhos bem alinhados ao ponto focal. Quando visto do ponto da secagem eficiente, ou seja, que possibilitou retirar a maior umidade do bagaço da cana-de-açúcar, o regime de bateladas do concentrador menor obteve bons resultados, contudo necessitando de um tempo maior, enquanto que os ensaios em batelada no outro concentrador teve rápida secagem, mas altas temperaturas causaram torrefação no material. Para solucionar este empasse, utilizou de regime rotativo, onde foi possível diminuir as temperaturas e não crescer o tempo de forma significativa. Estes resultados foram sendo moldados a partir das mudanças de três receptores, objetivando a eficiente secagem.

A partir do foco que capta e direciona o calor no reator, temperaturas foram registradas como condições de contorno para serem inseridas na modelagem do receptor, encontrando tensões que foram distribuídas por toda sua estrutura, promovendo deformações e deslocamentos. Tais tensões se não distribuíram uniformemente, encontrando uma fragilidade nas áreas de descontinuidades e, portanto, localizando os possíveis pontos de falhas de fadiga. Falhas de fadiga iniciam-se no local onde a tensão é maior, que neste caso ocorre na descontinuidade da geometria.

Com o objetivo de obter uma secagem de bagaço de cana-de-açúcar eficiente, as temperaturas alcançadas com o concentrador solar de 2,5m² já foram suficientes, visto que a secagem já está ocorrendo de forma rápida para este sistema. Contudo, analisando apenas a estrutura do reator, sendo basicamente feita em liga de alumínio, as temperaturas máximas para atingir o ponto de fusão de 660°C não suportaria a utilização de um concentrador maior que 4 m², e portanto, estudos para secagem de um material diferente teria esta limitação. Estimando a construção de concentrador solar com 10m², que seria um objetivo para secagem em larga escala, espera-se que o foco alcance em torno de 2900°C. Logo, necessitando de sistema e estrutura totalmente diferente.

7.3 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTURO

- Alterar dimensões e distanciamento dos furos do reator e realizar os ensaios novamente, para tentar distribuir melhor as tensões máximas ao longo da borda dos furos;
- Experimentar reatores com descontinuidades com formatos que apresentam vértices, como quadrados, retângulos, triângulos, pentágonos, ou até elíptico, para avaliar a distribuição de tensões;
- Construir concentradores solares de maiores áreas, a fim de observar as maiores temperaturas encontradas e observar o comportamento dos reatores e compará-los com os resultados obtidos no software;
- Calcular vida à fadiga do reator, uma vez que não há trabalhos que confirmem o número total de aplicações de carga que irá provocar a ruptura do corpo, nem a necessidade de manutenção do mesmo.

REFERÊNCIAS

(BRASIL), E. B. E. **Balanco Energético Nacional 2021**: Ano Base 2020. Rio de Janeiro: [s.n.], 2021. 292 p.

(BRASIL), EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2022**: ano base 2021. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2022.

Unsupported source type (ElectronicSource) for source FAO20.

Unsupported source type (Misc) for source ASS14.

AADIWAL, R.; HASSANI, M.; KUMAR, P. An Overview Study of Solar Cookers. [S.l.]: [s.n.], v. 4, 2017. Cap. 10, p. 1651- 1655.

ABAQUS/CAE. User's Manual, Versão 6.11. Disponível em: <http://130.149.89.49:2080/v6.11/pdf_books/CAE.pdf>. Acesso em: 10 Setembro 2021.

ADELAKUN, N.; OLANIPEKUN, B. A Review of Solar Energy.. **Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)**. Vol 6, Cap. 12, 2019.

AL-HABAHBEH, O. M.; ALOMOSH, R. A.; K, A. D. Reliability simulation of solar concentrator receiver. **International Journal of Sustainable Energy**, 2014.

AL-ROUSAN, N.; ISA, N. A. M.; & DESA, M. K. M. Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 82, p. 2548–2569, 2018.

ÁLVARES, L.; HERRERA, V. Análisis por medio de volumen finito y elementos finitos de un seguidor solar. **Avances de Investigación en Ingeniería en el Estado de Sonora, México**, v. 1, n. 5, p. 75-82, 2019.

ALVES, L. M. **Método dos Elementos Finitos**. Universidade Federal do Paraná. 2007, p. 439. 2007.

ARANTES, D. C. Bagaço de Cana-de-açúcar: Análise térmica e energética de biomassa. **Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, 2014. 90.

AZEVEDO, Á. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1. ed. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

BATHE, K.-J. **Finite Element Procedures**. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

BNDES, B. N. D. D. E. E. S.; CGEE, C. D. G. E. E. E. **Bioetanol de cana de açúcar:** energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: BNDES/CGEE, 2008.

BRANDIM, A. S.; SOUSA, R. R. M.; ALVES JR, C. Desenvolvimento de um equipamento para ensaio de fadiga térmica. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, 14, Abril 2009. 1-10.

CETINA-QUIÑONES, A. J. et al. Modelación térmica de un colector solar de canal parabólico. **Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal**, Mérida, v. 21, n. 1, p. 1-12, 2017.

CHIEPPE, J. B. **Gestão de resíduos**. Instituto Federal de Goiás; Universidade Federal de Santa Maria. Inhumas; Santa Maria. 2011.

CONCER, D. **Previsão de Fadiga Térmica de Matrizes para Injeção de Alumínio sob Pressão Utilizando a Equação de Basquin e Elementos Finitos**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 108. 2011.

CORREIA, M. A. C. **Avaliação energética da hibridização de uma caldeira a biomassa com concentrador de energia solar**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 51. 2017.

CUCE, E.; CUCE, P. **Comprehensive Review on Solar Cookers**. [S.l.]: Applied Energy, v. 102, 2013. 1399-1421 p.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4. ed. Madison: Wiley, 2013.

FAOSTAT, O. D. A. E. A. Sugar Beet White Sugar. In: _____ **Agribusiness handbook**. Roma: [s.n.], 2009.

FARIA, E. V. et al. Desenvolvimento e construção de um destilador solar para dessalinização de água salgada em diferentes concentrações de sais. **Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (XXXVII ENEMP)**, São Carlos, 2015.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. 1ª. ed. [S.l.]: LTC, 2009.

FISSOLO, A. et al. Thermal Fatigue Behavior for a 316 L Type Steel. **Journal of Nuclear Materials**, 1996. 156-161.

FOOD and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT**, 2023. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#home>>. Acesso em: 2023 Março 08.

GALDINO, M. et al. O Contexto das Energias Renováveis no Brasil. **Revista da Direng**, 2000.

GEANKOPOLIS, C. J. Transport Processes and Unit Operations. 3ª. ed. Singapore: Prentice Hall, 1993. Cap. 13.

GRAEBIN, G. O. **Secagem do bagaço de cana-de-açúcar e estudo da sua aplicação na remoção de metal pesado**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Toledo, p. 133. 2014.

GRANBIO. O que é Cana-energia. **GRANBIO**, 2020. Disponível em: <www.granbio.com.br>. Acesso em: 25 Outubro 2020.

IRENA. Solar Energy, 2022. Disponível em: <<https://www.irena.org/solar>>. Acesso em: 2023 Janeiro 03.

KALOGIROU, S. Solar energy engineering: processes and systems. **Academic Press/Elsevier**, n. 1, 2009.

KIMAMBO, C. Z. M. Development and performance testing of solar cookers. **Journal of Energy in Southern Africa.**, 18, 2017. 41-51.

LETCHER, T. M. Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet. **Elsevier**, Waltham, MA, n. 2, 2014.

MARANHÃO, D. C. **Projeto e Construção de um Concentrador Solar do Tipo Fresnel Linear**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 111. 2016.

MARTINS, F.; PEREIRA, E.; ABREU, L. Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project. **Solar Energy**, v. 81, p. 517-528, 2007.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Tchnology**, 83, 2002. 37-46.

NOWZARI, R. Solar Energy. In: _____ **The Palgrave Encyclopedia of Global Security Studies**. 1. ed. Switzerland: Springer Nature Switzerland, v. 1st, 2020.

PEREIRA, E. et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. p. 88.

QUÍMICA, BASILE. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico: Borracha de Silicone**. São Paulo. 2016.

RãBOACă, M. S. et al. Concentrating Solar Power Technologies. **Energies** **12** (6), p. 1-17, 2019.

RESTREPO, J. C. L. **Avaliação de uma planta de cogeração assistida por concentradores solares do tipo Fresnel do setor sucroalcooleiro**. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, p. 93. 2016.

RIBAS, V. E. **Estudo da utilização de concentradores solares para o processo de gaseificação de biomassa: concepção de um reator químico solar**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 103. 2016.

RITCHIE, H. Renewable Energy. **OurWorldInData.**, 2020. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/renewable-energy>>. Acesso em: 03 out 2020.

SANTOS, G. S. Concorrência ampliada dos produtos do sorgo sacarino na entressafra da cana-de-açúcar no Brasil. **Agroenergia**, Brasília, 3, Agosto 2011. 39-42.

SANTOS, W. et al. Uso de concentrador solar para secagem da cana-de-açúcar. **Encontro de Pesquisa e Inovação da Embrapa Agroenergia**, Brasília, 1 dez. 2020. 6.

SOARES, P.; ROSSELL, C. O Setor Sucroalcooleiro e o Domínio Tecnológico. **Núcleo de Análise Interdisciplinar de Políticas e Estratégia da Universidade de São Paulo (NAIPPE-USP)**, São Paulo, v. 2, 2006.

SOUZA, R. M. D. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Universidade Federal do Pará. Belém, p. 40. 2003.

TELLES, M.; SARAN, L.; UNÊDA-TREVISOLLI, S. Produção, propriedades e aplicações de bioplástico obtido a partir da cana-de-açúcar. **Ciência & Tecnologia**, Jaboticabal, II, 2011. 52-63.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. **The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals**. 6ª. ed. [S.l.]: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

APÊNDICE A - ANÁLISE MICROSCÓPICA DE RECIPIENTE

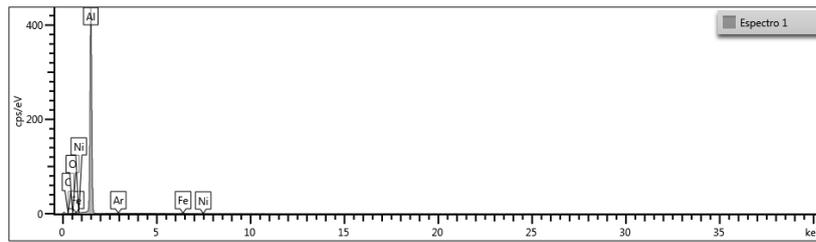


Figura 58 - Análise do interior do recipiente

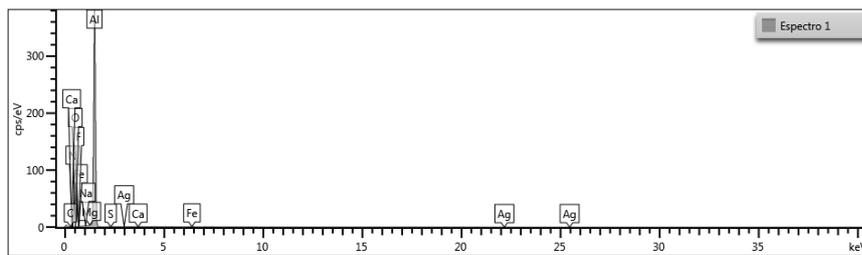
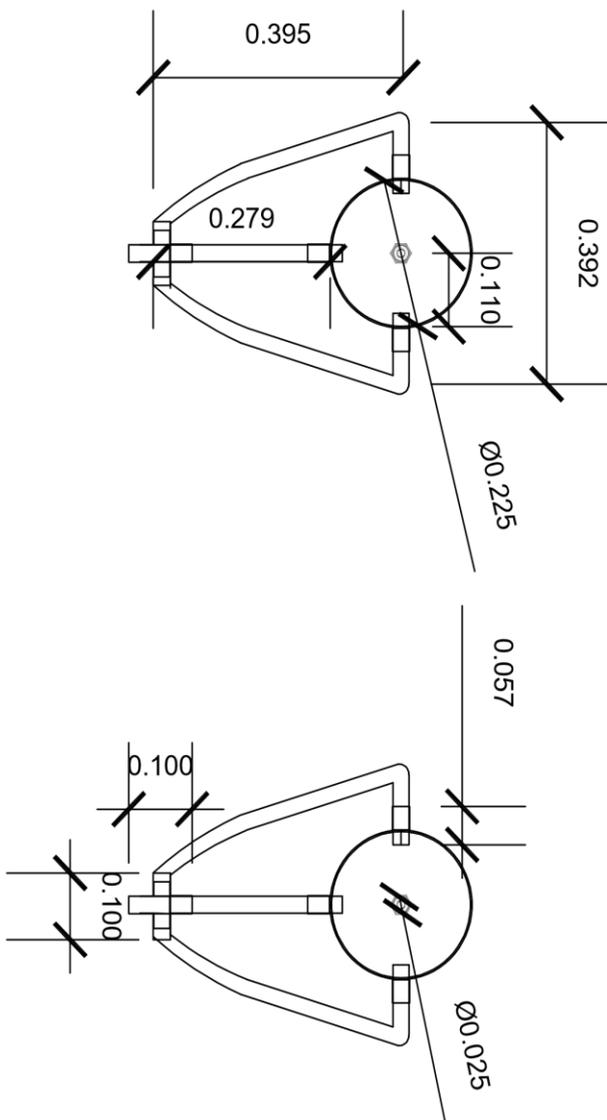


Figura 59 - Análise do exterior e interior do recipiente

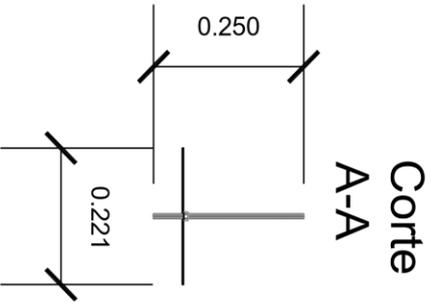
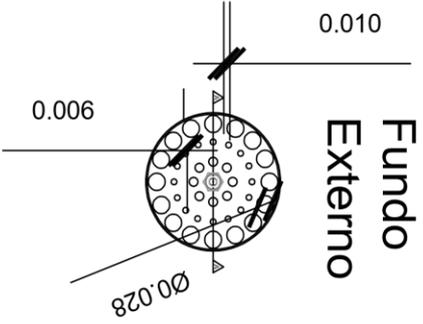
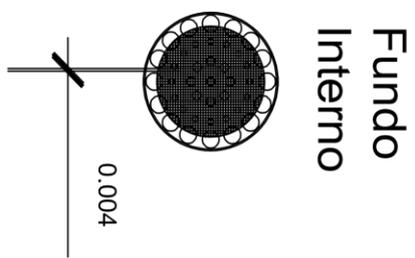
APÊNDICE B -REATOR 01

Descrição	
Desenho N°: 01	Data: 15/09/2021
Título: Protótipo 01 - Externo	Autor: Fernanda
	Escala: 1:10
	Empresa: EMBRAPA



APÊNDICE C - REATOR 02 E 03

Descrição	
Desenho N°: 02	Data: 15/09/2021
Título: Protótipo 01 - Cortes, malha e furo	Autor: Fernanda
	Escala: 1:10
	Empresa: EMBRAPA

 <p>Corte A-A</p>	 <p>Fundo Externo</p>	 <p>Fundo Interno</p>
---	--	---

APÊNDICE D - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Informações:

Recipiente 1 com alça de borracha: 1.505 kg

Recipiente 1 com alça de aço: 1.615 kg ou 1.625 kg

Índice

1. 1 m² - Recipiente 1 – alça de borracha (bagaço): experimento 4, 5, 6
2. 2,5 m² - Recipiente 1 – alça de borracha (bagaço): experimento 7
3. 2,5 m² - Recipiente 1 – alça de aço (bagaço): experimento 8, 9
4. 2,5 m² - Recipiente 1 – alça de aço (água): experimento 10, 11 e 12
5. 2,5 m² - Recipiente 1 – alça de aço (bagaço): experimento 13, 14, 15 e 16
6. 2,5 m² - Recipiente 2 – rotativo (água): experimento 17, 18, 19 e 20
7. 2,5 m² - Recipiente 2 – rotativo (bagaço) malha 1,7 mm: experimento 21
8. 2,5 m² - Recipiente 2 – rotativo (bagaço) malha 0,5 mm: experimento 22 (espelhado), 23, 24

Experimento 4

Concentrador 1 m² - 100g de bagaço - 12/05/2021 – 13:24 - Ar comprimido a 1000 cc/min

Hora	Massa (g)	T. Fundo °C	T. Lateral °C	Radiação solar (W/m ²)
13:24	1605	25	25	1058
13:34	1600	70	45	1094
13:47	1585	71	52	1025
14:01	1580	45	43,2	110,3
14:14	1580	28	27,5	114,1
14:27	1580	55	25	1020
14:40	1580	119,1	57,2	1010
14:53	1570	162,3	62,3	1028
15:06	1565	71	43,3	976
15:19	1565	163,2	64,9	980
15:24	1565	144,5	59,2	951
Massa bandeja (g)	Massa Bandeja + amostra (g)	Massa bandeja + amostra seca (g)	Teor de sólidos (%)	Teor de umidade (%)
388,76	446,43	443,4	94,75	5,25

Experimento 5

Concentrador 1 m² - 100g de bagaço - 14/05/2021 – 12:35 - Ar comprimido a 1000 cc/min

Hora	Massa (g)	T. Fundo °C	T. Lateral °C	Radiação (W/m²)
12:35	1605	21,1	21,1	1009
12:45	1595	149	54	1006
12:58	1585	106,3	54,3	1049
13:11	1580	157	64,2	1062
13:24	1575	161,6	64	1034
13:37	1570	106,1	59,1	1065
13:50	1570	159,6	68,9	1048
14:03	1565	145,6	66,7	1023
14:16	1565	180,2	67,7	1049
14:29	1565	110,5	60,8	1044
Massa bandeja (g)	Massa Bandeja + amostra (g)	Massa bandeja + amostra seca (g)	Teor de sólidos (%)	Teor de umidade (%)
1244,6	1301,12	1296,9	92,53	7,47

Experimento 6

20/05/2021 – 13:16 - Temperatura ambiente: 26 °C - 100 g de bagaço

Hora	Massa (g)	T. fundo (°C)	T. lateral (°C)	Radiação (W/m²)
13:16	1605	21,3	21,3	1051
13:26	1595	136,9	50,9	1052
13:39	1590	150,7	49,8	1052
13:52	1585	106,7	54,4	1028
14:05	1575	147,4	44,5	1013
14:18	1570	99,1	41,8	136
14:31	1565	134,6	50,3	992
14:44	1565	157,3	54,9	985
14:57	1565	11,4	52,8	808
15:10	1565	146,8	55,9	931
M _{bandeja} (g)	M _{bandeja + amostra} (g)	M _{bandeja + amostra seca} (g)	Teor de sólidos (%)	Teor de umidade (%)
1244,6	1298,61	1291,62	87,06	12,94
	54,01	47,02		

Experimento 7

1º experimento do concentrador 2,5 m - 01/06/2021 – 14:32 - Temperatura ambiente: 25 °C - Espelhos descalibrados

Hora	Massa (g)		T. fundo (°C)	T. lateral (°C)
14:32	1605		28,6	28,6
14:52	1590		170,5	67,5
15:12	1585		121,2	59,2
15:40	1580		79,9	39,8
16:00	1575		96,8	47,8
16:20	1570		86,2	46,5
Mbandeja (g)	Mbandeja + amostra (g)	Mbandeja + amostra seca (g)	Teor de sólidos (%)	Teor de umidade (%)
404	468,5	437,83	52,45	47,55

Experimento 8

09/06/2021 – 14:37 - Temperatura ambiente: 26 °C

Hora	Massa (g)	T. fundo (°C)	T. lateral (°C)	Radiação (W/m²)
14:37	1715	39,1	37,9	898
14:39	-	-	-	910 - Inicia fumaça
14:42	-	320	-	921
14:47	1630	195,2	104,9	114
14:57	1620	235,5	115,6	905
15:07	1620	189,6	95,8	884
Mbandeja (g)	Mbandeja + amostra (g)	Mbandeja + amostra seca (g)	Teor de sólidos (%)	Teor de umidade (%)
122,68	124,96	124,78	92,1	7,9

Houve torrefação total e perda de sólidos da amostra.

Experimento 9

09/06/2021 – 15:29 - Temperatura ambiente: 26 °C

15:29:30 – Inicia fumaça branda / 15:38 – Fumaça forte

Hora	Massa (g)	T. fundo (°C)	T. lateral (°C)	Radiação (W/m ²)
15:29	1725	22,1	22,3	845
15:34	1705	247,5	73,1	832
15:38	-	217,2	-	835
15:41	1665	295,6	138,6	832
Mbandeja (g)	Mbandeja + amostra (g)	Mbandeja + amostra seca (g)	Teor de sólidos (%)	Teor de umidade (%)
388,36	435,97	422,15	70,98	29,02

Houve uma torrefação parcial da amostra.

Experimento 10

17/06/2021 – 14:28 - Temperatura ambiente: 24 °C - 1 kg de água

Hora	T. água (g)	T. lateral (°C)	T. fundo (°C)	Radiação (W/m ²)
14:28	22,8	29,8	27,1	940
14:29	25,8	36,4	71,6	935
14:30	30,9	39,5	91,3	937
14:31	36,2	44,2	112,9	935
14:32	39,9	48,6	98	933
14:33	43,3	50,4	106,9	931
14:34	47,9	50,7	92,9	930
14:35	53,4	59	102,1	929
14:36	57,5	61,1	110,8	929
14:37	61,1	63,9	100,9	930
14:38	74	64,9	108,8	938
14:39	77	68,4	140,3	932
14:40	80	72,7	129,4	926
14:41	84	71,1	127,3	931
14:42	87	75,9	129,4	936
14:43	88	74,6	134,6	628
14:44	89	77,9	122,7	855
14:45	90	76,3	113,6	877
14:46	90	74,9	116,6	813
14:47	91	74,6	108,3	754
14:48	90	73,5	91,6	933
14:49	91	74,6	108,3	929
14:50	91,5	75,8	129,1	938
14:51	95	78,1	141,4	917

Após o experimento, a massa da água foi pesada novamente, contendo 874,97 g.

Experimento 11

18/06/2021 – 12:54 - 1 kg de água - Temperatura ambiente: 25 °C

Hora	T. água (g)	T. lateral (°C)	T. fundo (°C)	Radiação (W/m ²)
12:54	33,1	43,1	55,1	1008
12:55	35,6	35,2	139,3	972
12:56	37	37,1	163	956
12:57	38,3	42,3	143,3	963
12:58	39,4	44,1	165,6	961
12:59	40,5	46,5	161,3	946
13:00	41,6	48,3	156,3	957
13:01	42,2	49	146,3	952
13:02	42,9	52	127,2	961
13:03	43,5	54,1	127,2	964
13:04	44,1	55	122,6	969
13:05	44,8	56,6	109,8	970
13:06	45,3	57,3	98,9	969
13:07	45,8	58,2	78,1	942
13:08	46,3	60,6	98,9	966
13:09	46,3	60,8	99,6	958
13:10	46,8	60,7	110,8	970
13:11	47,1	60,9	110,6	969
13:12	47,3	60,9	170,9	970
13:13	47,5	61,6	145	973
13:14	47,5	63,6	171,1	962
13:15	85	64,3	157,6	971
13:16	92	68	191,3	963
13:17	96	67,5	192,2	956

Após o experimento, a massa da água foi pesada novamente, contendo 897,65 g.

Experimento 12

16/07/2021 – 11:38 - Temperatura ambiente: 25 °C

Hora	T. fundo (°C)	T. lateral (°C)	Radiação (W/m ²)
11:38	33,9	33,9	
11:39	229,1	44,4	
11:40	210,4	52,9	
11:41	259,2	56,1	
11:42	263	60,4	Fumaça
11:43	268,3	61,8	
11:44	284,3	68,5	
11:45	281,3	69,5	
11:46	278,5	72,4	
11:47	270,4	77,3	
11:48	268,6	74	
Mbandeja (g)	Mbandeja + amostra (g)	Sólidos (g)	Teor umidade
404	477,88	73,88	26,12%

Experimento 13

16/07/2021 – 12:03:20 - Temperatura ambiente: 25 °C

Hora	T. fundo (°C)	T. lateral (°C)	Radiação (W/m ²)
12:03:20	19,8	19,8	
12:04:20	240,5	38,3	
12:05:20	264,5	48,5	
12:06:20	280	56,4	
12:07:20	277,5	60,9	Fumaça
12:08:20	289,2	63,7	
12:09:20	342,3	82,3	
12:10:20	312,6	106,4	
12:11:20	305,4	110,3	
12:12:20	314,7	111,2	
Amostra (g)	Amostra úmida(g)	Umidade	
100	81,4	0,186	

Experimento 14

16/07/2021 – 12:52 - Temperatura ambiente: 25 °C

Hora	T. fundo (°C)	T. lateral (°C)	Radiação (W/m²)
12:52	27,1	27,1	
12:53	224,4	36,3	
12:54	259,8	45,8	
12:55	278,3	56,9	fumaça
12:56	300,6	66,5	
12:57	312,5	70,3	
12:58	338,1	75,8	
12:10:20	365,3	118,9	
Amostra (g)		Amostra úmida(g)	
100		70,1	

Experimento 15

16/07/2021 – 13:11 - Temperatura ambiente: 25 °C

Hora	T. fundo (°C)	T. lateral (°C)	Radiação (W/m²)	
13:11	31,6	34,2		
13:12	202,9	43,9		
13:13	242,8	49,9		
13:14	257,6	55,7		
13:15	260,5	61,9	Fumaça	
13:16	282,4	67,1		
Amostra (g)	Amostra úmida (g)	Amostra seca	Teor de sólidos (%)	Teor de umidade (%)
100	77,43	59,57	76,93%	23,06

Experimento 16

16/07/2021 – 13:22:30 - Temperatura ambiente: 25 °C

Hora	T. fundo (°C)		T. lateral (°C)	
13:22:30	36,1		36,1	
13:23:30	242,1		47,9	
13:24:30	259,9		58	
13:25:30	298,9		69,1	
Amostra (g)	Amostra úmida (g)	Amostra seca	Teor de sólidos (%)	Teor de umidade (%)
100	86,66	53,75	62,02	37,97

Experimento 17

Recipiente 2 – rotativo - 20/07/2021 – 11:26 - 1 kg de água

Hora	T. água (°C)	T. fundo (°C)	T. lateral (°C)	Radiação (W/m ²)
11:26	30,5	38,1	35,9	991
11:27	41,9	66,4	37,1	998
11:28	49,3	85,4	44,1	995
11:29	56,6	80,2	50,8	992
11:30	60,1	89,1	55,6	993
11:31	62,9	90,9	61,9	995
11:32	67,4	89,8	65,1	990
11:33	70	91,2	64,9	990
11:34	73,1	93,5	64,6	991
11:35	73,8	87,3	62,6	997
11:36	75	83,4	68	996
11:37	74,9	75,1	71,6	995
11:38	75,3	76,8	62,2	992
11:39	84,8	102,1	63,9	992
11:40	93,9	102,4	64,4	994
11:41	99,3	92,8	68,3	998
11:42	96,3	108,8	76,9	998

Após o experimento, a massa da água foi pesada novamente, contendo 825,50 g..

Experimento 18

20/07/2021 – 12:00:20 - 500 g de água – Temperatura ambiente: 24 °C

Hora	T. água (°C)	T. fundo (°C)	T. lateral (°C)	Radiação (W/m ²)
12:00:20	31,8	35,8	29,3	987
12:01:20	70,9	103,8	38,2	984
12:02:20	87,9	110,1	46,7	985
12:03:20	95,9	91,3	55,6	972
12:04:20	101,3	103,3	60,5	971

Após o experimento, a massa da água foi pesada novamente, contendo 482,91 g.

Experimento 19

20/07/2021 – 12:23 - 500 g de água - Temperatura ambiente: 24° C

Hora	T. água (°C)	T. fundo (°C)	T. lateral (°C)	Radiação (W/m ²)
12:23	24,4	24,8	22,3	974
12:24	44,2	83,7	28,3	972
12:25	56,1	82,1	37,6	968
12:26	63,4	81,9	46,6	967
12:27	71,3	92,5	52,8	970
12:28	77,3	102,9	56,6	972
12:29	80,6	104,4	59,3	970
12:30	76,1	102,9	62,2	969
12:31	97,7	93,3	68,7	964
12:32	99	95,6	64,6	966

Após o experimento, a massa da água foi pesada novamente, contendo 428,91 g.

Experimento 20

20/07/2021 – 12:38 - 1000 g de água - Temperatura ambiente: 24°C

Hora	T. água (°C)	T. fundo (°C)	T. lateral (°C)	Radiação (W/m ²)
12:38	25,6	31,6	26,2	802
12:39	34,3	53,6	34,1	456
12:40	40,7	60	35,7	976
12:41	48,9	66,1	40,3	973
12:42	56,7	86,6	45,6	970
12:43	64,6	84,1	50,3	975
12:44	69,7	85,9	54,5	970
12:45	77,1	90,9	59,9	966
12:46	83,3	102,9	65,6	967
12:47	88	104,3	70,8	971
12:48	92,8	94,6	74,8	971
12:49	97,1	107,3	80,8	974
12:50	98,3	103,6	80,1	973

Após o experimento, a massa da água foi pesada novamente, contendo 911,58 g.

Experimento 21

Rotativo - Bagaço 100 g - 17/08/2021 – 13:49

O reator contém abertura de malha em 1,7 mm.

Hora	T. fundo (°C)	T. lateral (°C)	Radiação (W/m ²)	
13:49	45,8	45,2	931	
13:50	105,6	47,1	936	
13:51	201,6	63,1	930	
13:52	234,7	138,6	932	
13:53	217,1	140	938	
13:54	185,1	142,3	932	
Tara da bandeja (g)	Amostra úmida(g)	Amostra seca (g)	Teor de sólidos	Teor de Umidade
388,54	462,65	447,43	79,46%	20,54%

Experimento 22

Malha 0,5 mm – Espelhado - 19/08/2021 – 11:52:30 - 100 g de bagaço

Hora	T. fundo (°C)	T. lateral (°C)	Radiação (W/m ²)	
11:52:30	40,9	40,2	981	
11:53:30	103,9	83,3	980	
11:54:30	137,1	65,4	984	
11:55:30	153,4	121,1	984	
11:56:30	98,3	111,8	986	
11:57:30	127,1	90,7	992	
Tara da bandeja (g)	Amostra úmida(g)	Amostra seca (g)	Teor de sólidos	Teor de Umidade
356,82	437,22	416,25	73,92%	26,08%

Experimento 23

Não espelhado - Malha 0,5 mm - 19/08/2021 - 100 g de bagaço

Hora	T. fundo (°C)	T. lateral (°C)	Radiação (W/m ²)	
12:08	36	33,6	1002	
12:09	216,9	40,7	990	
12:10	247,3	51,4	990	
12:11	268,4	57,4	994	
12:12	264,1	64,9	1006	
Tara da bandeja (g)	Amostra úmida(g)	Amostra seca (g)	Teor de sólidos	Teor de Umidade
404,1	488,29	469,13	77,24%	22,76%

Experimento 24

Não espelhado - Malha 0,5 mm - 19/08/2021 - 100 g de bagaço

Hora	T. fundo (°C)	T. lateral (°C)	Radiação (W/m ²)	
12:25	30,6	32,3	1042	
12:26	160,6	36	388	
12:27	135,7	37,5	283	
12:28	193,1	42,1	1028	
12:29	181,8	53,4	1012	
12:30	160,1	71,1	997	
Tara da bandeja (g)	Amostra úmida(g)	Amostra seca (g)	Teor de sólidos	Teor de Umidade
388,66	458,23	447,79	84,99%	15,01%

RESUMO DOS EXPERIMENTOS

Nº do Exp.	Tempo	Umidade (%)	Perda (%)	Temp. Max	Radiação	Observações
4	2 hrs	5,25		163,2	Constante e alta	
5	1:59 hrs	7,47		180,2	Constante e alta	
6	1:54 hrs	12,84		150,7	Algumas variações	
7	01:48	47,55		170,5	Constante e alta	Concentrador desalinhado
8	00:20	7,9		320	Constante e alta	Torrefação
9	00:12	29,02		295,6	Constante e alta	Torrefação parcial
13	00:09	27,4	18,6	342,2	Constante e alta	Fumaça 4 min
14	00:18	16	30	365,3	Constante e alta	Fumaça 4 min
15	00:05	23,06		282,6	Constante e alta	Fumaça 4 min
16	00:03	37,97		298,9	Constante e alta	
21	5	20,5	25,89	234,7	Tempo c/ nuvens	
22	5	20,97	20,6	153,4	Tempo c/ nuvens	Espelhado
23	4	22,75	20,6	268,4	Tempo c/ nuvens	
24	5	15	30,4	193	Nublado	

APÊNDICE E – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CALORIMETRIA E TGA

Ensaio Calorimétrico		
Amostra	Massa g	Resultado Mj/kg
1M	0,4994	18,319
1M	0,5821	18,41
1M	0,6937	18,243
2M	0,881	18,476
2M	0,8236	18,236
2M	0,8007	18,214
3M	0,7229	18,569
3M	0,6161	18,54
3M	0,6378	18,601
4M	0,6782	18,585
4M	0,8048	17,82
4M	0,833	17,783
5M	0,7638	17,329
5M	0,9917	17,724
5M	1,1724	17,658
6M	0,6749	15,816
6M	0,699	16,758
6M	0,8252	16,036
2,5teste	0,6673	17,416
2,5teste	0,9284	16,705
1JN	0,7574	19,176
1JN	0,5909	17,682
1JN	0,8274	16,973

Ensaio TGA					
Amostra	Umidade	Volátil	Carbono fixo	Cinza	Cinza seca
5M	4,1	79,2	12,71	3,99	4,16
5M	3,45	79,67	12,77	4,11	4,26
2JN	2,72	18,65	18,65	4,83	4,97
2JN	2,87	16,72	16,72	2,77	2,85
5M	2,8	82,88	12,92	1,4	1,44

APÊNDICE F – RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA

RESULTADO 1											
Ponto A		Ponto B		Ponto C		Ponto D		Ponto E		Ponto F	
Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,02	100,001	0,02	100,001	0,02	0,21892	0,02	0,18243	0,02	0,1684	0,02	0,14033
0,04	100,001	0,04	100,001	0,04	0,04558	0,04	0,03798	0,04	0,03506	0,04	0,02921
0,06	100,002	0,06	100,001	0,06	0,29539	0,06	0,24616	0,06	0,22722	0,06	0,18935
0,1	100,002	0,1	100,001	0,1	0,58702	0,1	0,48918	0,1	0,45155	0,1	0,37629
0,18	100,002	0,18	100,002	0,18	0,75324	0,18	0,6277	0,18	0,57942	0,18	0,48285
0,34	100,002	0,34	100,002	0,34	1,4482	0,34	1,20684	0,34	1,114	0,34	0,92834
0,54	100,002	0,54	100,002	0,54	3,67628	0,54	3,06357	0,54	2,82791	0,54	2,35659
0,74	100,002	0,74	100,002	0,74	6,96922	0,74	5,80769	0,74	5,36094	0,74	4,46745
0,94	100,002	0,94	100,002	0,94	10,87201	0,94	9,06001	0,94	8,36309	0,94	6,96924
1,14	100,002	1,14	100,002	1,14	15,02764	1,14	12,52303	1,14	11,55972	1,14	9,6331
1,34	100,002	1,34	100,002	1,34	19,20516	1,34	16,0043	1,34	14,7732	1,34	12,311
1,54	100,002	1,54	100,002	1,54	23,27036	1,54	19,39197	1,54	17,90028	1,54	14,9169
1,74	100,002	1,74	100,002	1,74	27,15289	1,74	22,62741	1,74	20,88684	1,74	17,4057
1,94	100,002	1,94	100,002	1,94	30,82154	1,94	25,68462	1,94	23,70888	1,94	19,7574
2,14	100,002	2,14	100,002	2,14	34,26758	2,14	28,55632	2,14	26,35968	2,14	21,9664
2,34	100,002	2,34	100,002	2,34	37,49491	2,34	31,24576	2,34	28,84224	2,34	24,0352
2,54	100,002	2,54	100,002	2,54	40,51414	2,54	33,76178	2,54	31,16472	2,54	25,9706
2,74	100,002	2,74	100,002	2,74	43,33898	2,74	36,11582	2,74	33,33768	2,74	27,7814
2,94	100,002	2,94	100,002	2,94	45,98365	2,94	38,31971	2,94	35,37204	2,94	29,4767
3,14	100,002	3,14	100,002	3,14	48,46296	3,14	40,3858	3,14	37,2792	3,14	31,066
3,34	100,002	3,34	100,002	3,34	50,79064	3,34	42,32553	3,34	39,06972	3,34	32,5581
3,54	100,002	3,54	100,002	3,54	52,97963	3,54	44,14969	3,54	40,75356	3,54	33,9613
3,74	100,002	3,74	100,002	3,74	55,04164	3,74	45,86803	3,74	42,33972	3,74	35,2831
3,94	100,002	3,94	100,002	3,94	56,98742	3,94	47,48952	3,94	43,83648	3,94	36,5304
4,14	100,002	4,14	100,002	4,14	58,82698	4,14	49,02248	4,14	45,25152	4,14	37,7096
4,34	100,002	4,34	100,002	4,34	60,56887	4,34	50,47406	4,34	46,59144	4,34	38,8262
4,54	100,002	4,54	100,002	4,54	62,22122	4,54	51,85102	4,54	47,86248	4,54	39,8854
4,74	100,002	4,74	100,002	4,74	63,79121	4,74	53,15934	4,74	49,07016	4,74	40,8918
4,94	100,002	4,94	100,002	4,94	65,28522	4,94	54,40435	4,94	50,2194	4,94	41,8495
5,14	100,002	5,14	100,002	5,14	66,70934	5,14	55,59112	5,14	51,31488	5,14	42,7624
5,34	100,002	5,34	100,002	5,34	68,06873	5,34	56,72394	5,34	52,36056	5,34	43,6338
5,54	100,002	5,54	100,002	5,54	69,36821	5,54	57,80684	5,54	53,36016	5,54	44,4668
5,74	100,002	5,74	100,002	5,74	70,61231	5,74	58,84359	5,74	54,31716	5,74	45,2643
5,94	100,002	5,94	100,002	5,94	71,80493	5,94	59,83744	5,94	55,23456	5,94	46,0288
6,14	100,002	6,14	100,002	6,14	72,94981	6,14	60,79151	6,14	56,11524	6,14	46,7627
6,34	100,002	6,34	100,002	6,34	74,05024	6,34	61,70853	6,34	56,96172	6,34	47,4681
6,54	100,002	6,54	100,002	6,54	75,10916	6,54	62,59097	6,54	57,77628	6,54	48,1469
6,74	100,002	6,74	100,002	6,74	76,12972	6,74	63,44143	6,74	58,56132	6,74	48,8011
6,94	100,002	6,94	100,002	6,94	77,11408	6,94	64,26173	6,94	59,31852	6,94	49,4321
7,14	100,002	7,14	100,002	7,14	78,06474	7,14	65,05395	7,14	60,0498	7,14	50,0415
7,34	100,002	7,34	100,002	7,34	78,98405	7,34	65,82004	7,34	60,75696	7,34	50,6308
7,54	100,002	7,54	100,002	7,54	79,87372	7,54	66,56143	7,54	61,44132	7,54	51,2011
7,74	100,002	7,74	100,002	7,74	80,73577	7,74	67,27981	7,74	62,10444	7,74	51,7537
7,94	100,002	7,94	100,002	7,94	81,57193	7,94	67,97661	7,94	62,74764	7,94	52,2897
8,14	100,002	8,14	100,002	8,14	82,38376	8,14	68,65313	8,14	63,37212	8,14	52,8101
8,34	100,002	8,34	100,002	8,34	83,1728	8,34	69,31067	8,34	63,97908	8,34	53,3159
8,54	100,002	8,54	100,002	8,54	83,94017	8,54	69,95014	8,54	64,56936	8,54	53,8078
8,74	100,002	8,74	100,002	8,74	84,6871	8,74	70,57258	8,74	65,14392	8,74	54,2866
8,94	100,002	8,94	100,002	8,94	85,41515	8,94	71,17929	8,94	65,70396	8,94	54,7533
9,14	100,002	9,14	100,002	9,14	86,12495	9,14	71,77079	9,14	66,24996	9,14	55,2083
9,34	100,002	9,34	100,002	9,34	86,8179	9,34	72,34825	9,34	66,783	9,34	55,6525
9,54	100,002	9,54	100,002	9,54	87,49463	9,54	72,91219	9,54	67,30356	9,54	56,0863
9,74	100,002	9,74	100,002	9,74	88,15607	9,74	73,46339	9,74	67,81236	9,74	56,5103
9,94	100,002	9,94	100,002	9,94	88,803	9,94	74,0025	9,94	68,31	9,94	56,925
10	100,002	10	100,002	10	88,99582	10	74,16318	10	68,45832	10	57,0486

RESULTADO 2											
Ponto A		Ponto B		Ponto C		Ponto D		Ponto E		Ponto F	
Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)
0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
2,8688	8,31597	14,5049	8,31597	0	0	0	0,28258	0	0,24039	0	0,22329
10,802	16,2075	2,86875	14,60786	0	0	0	0,05883	0	0,05004	0	0,04648
14,505	24,15235	40	24,52559	0	0	0	0,38128	0	0,32436	0	0,30129
46,24	32,89701	57,8759	42,01493	0	0	0	0,7577	0	0,64458	0	0,59875
73,743	38,81566	93,3133	52,67916	0	0	0	0,97227	0	0,82712	0	0,76831
112,88	44,78763	120,817	60,62401	0	0	0	1,86929	0	1,59025	0	1,47717
140,39	50,33303	156,254	68,56886	0	0	0	4,74523	0	4,03684	0	3,74981
175,82	57,85131	171,593	75,71389	0	0	0	8,99566	0	7,65274	0	7,10861
207,03	62,22364	203,328	83,60542	0	0	0	14,03327	0	11,93831	0	11,08945
242,47	69,74193	227,129	91,17703	0	21,01	0	21,07	0	21,001	0	15,32819
269,97	76,88696	242,467	96,29586	136,66	38	136,663	24,78943	136,6626	21,08874	136,663	19,58926
301,71	82,43236	274,202	101,46801	378,83	43	378,829	30,03667	378,8287	25,55265	378,829	23,73577
321,28	86,80469	293,772	105,41377	428,03	47,59359	428,027	35,04812	428,0273	29,81596	428,027	27,69595
332,91	89,95064	309,64	108,23979	477,23	54,024	477,226	39,7835	477,2258	33,84443	477,226	31,43797
353,01	93,14991	345,077	111,75899	526,42	60,06421	526,424	44,23154	526,4243	37,62844	526,424	34,95294
384,22	95,92261	364,647	114,15844	575,62	65,72108	575,623	48,39728	575,6229	41,1723	575,623	38,24481
411,72	99,06856	400,084	116,13132	624,82	71,01318	624,821	52,2944	624,8214	44,48764	624,821	41,32442
455,09	101,89458	435,521	118,1042	674,02	75,96456	674,02	55,94063	674,0199	47,58954	674,02	44,20576
478,89	103,44089	478,892	120,13041	723,22	80,60014	723,218	59,35428	723,2185	50,49359	723,218	46,90333
502,16	105,41377	545,536	122,90311	772,42	84,94588	772,417	62,5545	772,417	53,21606	772,417	49,43222
533,9	106,64016	604,774	125,24924	821,62	89,02583	821,616	65,55899	821,6156	55,77203	821,616	51,80645
557,17	107,81322	671,418	127,64869	870,81	92,8627	870,814	68,38447	870,8141	58,17571	870,814	54,03922
576,74	108,98629	750,226	129,24832	920,01	96,47699	920,013	71,04605	920,0126	60,43995	920,013	56,14247
604,77	111,01249	860,24	132,02102	969,21	99,88755	969,211	73,55761	969,2112	62,57658	969,211	58,12717
659,78	113,78519	934,817	133,99391	1018,4	103,11193	1018,41	75,93205	1018,41	64,59654	1018,41	60,00352
730,13	117,35771	1017,33	136,39336	1067,6	106,16512	1067,61	78,18044	1067,608	66,50928	1067,61	61,78025
824,8	121,30347	1127,87	139,91255	1116,8	109,06135	1116,81	80,31324	1116,807	68,32369	1116,81	63,46565
911,55	124,44942	1229,95	141,93876	1166	111,81323	1166,01	82,33973	1166,005	70,04765	1166,01	65,06703
1013,6	128,44851	1320,4	144,28489	1215,2	114,43193	1215,2	84,26815	1215,204	71,68819	1215,2	66,59092
1147,4	132,82084	1449,98	148,65722	1264,4	116,92813	1264,4	86,10637	1264,402	73,25199	1264,4	68,04353
1269,1	135,96679	1540,43	150,6301	1313,6	119,31087	1313,6	87,86102	1313,601	74,7447	1313,6	69,4301
1399,2	139,53931	1666,31	153,4028	1362,8	121,5886	1362,8	89,53835	1362,799	76,17163	1362,8	70,75557
1477,5	142,312	1796,42	157,40189	1412	123,76926	1412	91,14419	1411,998	77,53775	1412	72,02455
1619,2	146,68434	1890,57	159,37477	1461,2	125,85968	1461,2	92,68359	1461,197	78,84733	1461,2	73,24103
1741,4	150,25686	2024,38	163,32054	1510,4	127,86643	1510,4	94,16137	1510,395	80,10451	1510,4	74,40881
1816	152,60299	2111,12	165,71999	1559,6	129,79526	1559,59	95,58177	1559,594	81,31286	1559,59	75,53124
1906,4	154,62919	2169,83	166,89305	1608,8	131,65134	1608,79	96,9486	1608,792	82,47564	1608,79	76,61135
2020,7	158,57495	2260,28	169,66575	1658	133,44017	1657,99	98,26589	1657,991	83,59628	1657,99	77,65231
2099	160,54784	2382,46	172,86502	1707,2	135,16556	1707,19	99,53648	1707,189	84,67719	1707,19	78,65636
2189,4	163,32054	2449,1	174,41133	1756,4	136,83188	1756,39	100,76356	1756,388	85,72109	1756,39	79,62603
2229,1	164,92017			1805,6	138,44324	1805,59	101,95018	1805,586	86,73056	1805,59	80,56373
2260,3	166,09324			1854,8	140,00266	1854,78	103,09853	1854,785	87,70748	1854,78	81,47119
2295,7	167,31962			1904	141,51366	1903,98	104,21125	1903,983	88,65409	1903,98	82,35049
2342,8	168,86594			1953,2	142,97928	1953,18	105,29054	1953,182	89,57226	1953,18	83,20337
2394,1	170,46557			2002,4	144,40225	2002,38	106,33842	2002,38	90,4637	2002,38	84,03143
2449,1	172,43845			2051,6	145,78528	2051,58	107,3569	2051,579	91,33014	2051,58	84,83626
--	--	--	--	2100,8	147,13033	2100,78	108,34739	2100,777	92,17276	2100,78	85,61897
--	--	--	--	2150	148,43955	2149,98	109,3115	2149,976	92,99295	2149,98	86,38084
--	--	--	--	2199,2	149,71567	2199,17	110,25124	2199,175	93,7924	2199,17	87,12345
--	--	--	--	2248,4	150,95981	2248,37	111,16743	2248,373	94,57182	2248,37	87,84745
--	--	--	--	2297,6	152,17442	2297,57	112,06187	2297,572	95,33273	2297,57	88,55426
--	--	--	--	2346,8	153,36059	2346,77	112,93537	2346,77	96,07583	2346,77	89,24452
--	--	--	--	2396	154,51996	2395,97	113,78914	2395,969	96,80214	2395,97	89,91919
--	--	--	--	2445,2	155,6539	2445,17	114,62418	2445,167	97,51252	2445,17	90,57906
--	--	--	--	2459,9	155,99187	2459,93	114,87306	2459,927	97,72425	2459,93	90,77573

RESULTADO 3											
Ponto A		Ponto B		Ponto C		Ponto D		Ponto E		Ponto F	
Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)
3,9465	20,87277	0,5222	21,53967	5,54452	20,87277	3,94652	20,87277	2,34852	20,11059	2,34852	22,12165
32,254	21,53967	17,187	21,53967	27,2317	22,96875	13,99109	21,53967	22,20937	22,96875	22,2094	25,26563
52,115	22,96875	38,874	23,63566	42,0702	27,82764	32,25394	21,53967	30,42765	26,39855	30,4277	29,03841
80,422	31,92434	52,115	28,49454	50,5168	31,92434	55,53907	31,92434	43,89651	35,44941	43,8965	38,99435
108,73	42,30901	62,159	32,68652	62,1594	38,87921	62,15936	38,87921	50,51679	43,07119	50,5168	47,37831
135,21	52,02677	76,998	38,87921	72,2039	44,405	68,77964	45,83408	57,13707	49,26388	57,1371	54,19027
160,32	62,50671	82,02	43,07119	80,4222	51,35987	75,39993	54,88494	62,15936	54,88494	62,1594	60,37343
185,21	70,79539	92,065	47,93007	85,4445	56,21875	82,02021	62,50671	65,35536	59,74382	65,3554	65,7182
206,89	79,08407	100,28	54,12276	90,4668	60,41073	87,04249	72,89138	67,18164	65,26961	67,1816	71,79657
228,35	88,13493	113,75	58,98164	97,0871	64,6027	100,2831	84,70513	73,80193	71,4623	73,8019	78,60853
258,49	98,5196	128,59	68,69941	100,283	69,46158	108,7296	95,75671	80,42221	77,75026	80,4222	85,52529
281,77	106,90355	148,68	77,75026	107,132	74,98737	125,3945	108,23737	82,02021	82,60915	82,0202	90,87006
306,65	116,62132	161,92	86,80112	115,35	81,94224	132,0148	121,4802	88,64049	85,37204	88,6405	93,90924
333,13	124,91	176,99	94,4229	126,992	87,46803	145,2553	133,29395	92,06478	90,23092	92,0648	99,25401
353,22	131,86487	196,85	103,37848	133,613	91,66	150,2776	141,58263	97,08706	99,28178	97,0871	109,20996
379,7	139,48664	208,49	110,33335	146,853	99,28178	160,3222	154,06329	105,3053	107,57046	105,305	118,32751
409,84	147,77533	226,75	120,71802	160,322	107,57046	170,1385	165,87704	126,9925	137,39066	126,992	151,12973
436,32	151,9673	241,82	129,10198	173,563	117,28822	178,585	177,69079	143,6573	158,25527	143,657	174,0808
464,63	157,49309	260,08	136,72375	181,781	127,00599	190,2276	190,17145	160,3222	175,5948	160,322	193,15428
502,98	161,68507	274,92	145,77461	196,848	133,96086	198,4459	204,7481	170,1385	190,17145	170,138	209,18859
537,91	165,87704	293,41	156,82618	213,513	146,44151	211,9147	215,79967	186,8033	209,60698	186,803	230,56768
572,83	169,30684	311,68	165,87704	225,155	157,49309	226,7533	229,70941	201,8702	224,18362	201,87	246,60198
617,58	174,16572	331,54	175,5948	241,82	168,63993	233,3736	240,76098	211,9147	242,85697	211,915	267,14267
654,33	176,92862	346,6	185,31257	258,485	181,7875	250,0384	254,00382	226,7533	255,33763	226,753	280,87139
702,5	180,45369	364,87	194,26815	271,726	192,26744	261,681	265,7223	236,7979	269,91427	236,798	296,9057
742,45	183,21658	391,35	205,415	286,564	203,31901	281,7702	276,86914	248,4405	284,49092	248,44	312,94001
794,04	186,64638	418,06	211,60769	300,033	212,36987	295,0107	284,49092	255,0607	296,30467	255,061	325,93514
838,79	190,17145	439,74	215,79967	309,849	219,32474	306,6533	288,6829	263,279	305,35553	263,279	335,89108
888,78	192,26744	477,87	219,99165	321,492	231,04322	328,3404	292,1127	288,3904	312,21513	288,39	343,43664
935,35	195,69724	537,91	222,75454	336,559	240,76098	344,777	296,30467	314,8716	317,07401	314,872	348,78141
975,3	197,03105	584,48	225,51743	349,799	249,81184	366,4641	297,63848	338,1567	319,93218	338,157	351,9254
1016,8	200,55612	647,48	228,28033	368,062	257,43362	384,727	299,06757	366,4641	320,59908	366,464	352,65899
1048,4	201,88993	687,43	230,37632	388,151	260,86342	406,4141	301,16355	398,1958	321,26599	398,196	353,39259
1080	203,98592	730,81	233,13921	411,436	265,05539	428,1013	301,83046	423,079	324,69579	423,079	357,16537
		768,93	235,2352	437,918	265,7223	459,6047	305,35553	449,5601	325,45796	449,56	358,00376
		787,19	235,9021	469,649	267,15138	502,9789	308,11842	486,3141	326,12487	486,314	358,73736
		823,95	237,99809	499,555	269,24737	536,0804	310,88132	527,8621	329,55467	527,862	362,51014
		860,47	240,09408	544,527	270,58118	574,4324	313,64421	602,7398	331,65066	602,74	364,81573
		891,98	240,09408	576,03	271,34336	617,5783	316,4071	647,4838	335,84263	647,484	369,42689
		920,29	240,76098	609,36	272,67717	654,3323	319,93218	702,5006	337,93862	702,501	371,73248
		940,37	242,85697	644,288	275,44006	694,054	322,69507	757,2892	338,60553	757,289	372,46608
		958,64	242,85697	685,836	276,86914	742,4506	325,45796	803,8594	343,46441	803,859	375
		971,88	244,28606	725,786	278,29823	792,2169	328,22086	855,452	344,13131	855,452	376
		1000,2	244,95296	763,909	281,06112	827,1446	332,41283	898,8263	347,65638	898,826	377
		1023,5	245,61987	807,284	281,72803	862,0723	335,84263	945,3965	348,99019	945,397	380
		1048,4	248,38276	848,832	284,49092	893,804	337,27171	986,9445	351,84836	986,945	381
		1080	249,14494	888,782	285,92	926,9054	339,27243	1011,828	353,84908	1011,83	382
				926,905	288,6829	941,9722	340,03461	1043,331	356,61197	1043,33	383
				963,659	288,6829	970,2797	343,46441	1080	356,61197	1080	384
				995,163	290,77888	1008,403	346,98948				
				1026,89	292,1127	1041,733	347,65638				
				1051,78	292,7796	1080	351,84836				
				1080	294,87559						