



## **MODELAGEM DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DA FERMENTAÇÃO DA MASSA DO CACAU PARA TRÊS DIFERENTES FERMENTADORES.**

**Marcelo Bruno Chaves Franco, [chaves.bruno.franco@gmail.com](mailto:chaves.bruno.franco@gmail.com)<sup>1</sup>**  
**Jorge Henrique Sales, [jhosales@uesc.br](mailto:jhosales@uesc.br)<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Santa Cruz, Campus Soane Nazaré de Andrade, Rodovia Jorge Amado, km 16, Bairro Salobrinho CEP 45662-900. Ilhéus-Bahia.

**Resumo.** O processo de fermentação das sementes de cacau ocorre a partir da sua deposição em cochos de madeira, que se localizam nas Casas de Fermentação. Assim, são necessários em média, 6 dias para o término deste processo, cujo o manuseio da massa de cacau é efetuado por trabalhadores rurais em tempos predeterminados. Este processo tradicional, é ineficiente devido à distribuição de temperatura não uniforme na massa de cacau, necessitando, assim, de intervenção externa para uniformizar a temperatura. Conseqüentemente, estas ações externas podem possibilitar possíveis contaminações. Desta forma, o objetivo deste artigo é apresentar um método mais eficiente quanto a uniformização da temperatura gerada no processo de fermentação do cacau. As principais ferramentas para execução do trabalho são, softwares de Computer Assisted Design (CAD) e Computer Assisted Engineering (CAE). A partir das simulações executadas no software CAE, investigaram-se as respectivas distribuições de temperatura no interior de cada três modelos de fermentadores, averiguando a ocorrência ou não de uniformidade da temperatura na massa de cacau. Assim, os resultados das simulações indicam o fermentador rotativo como o mais eficiente, com relação aos outros modelos analisados, pois apresentou uma distribuição mais uniforme da temperatura na massa de cacau, no processo fermentativo.

**Palavras chave:** Modelagem Computacional. Transferência de Calor. Fermentador. Cacau.

### **1. INTRODUÇÃO**

O processo de beneficiamento do cacau é subdividido em 5 etapas, sendo: colheita, quebra, fermentação, secagem e armazenamento, assim estas etapas podem ser responsáveis por até 50% das características organolépticas (principalmente sobre o sabor e o aroma) dos produtos derivados do cacau. Assim, o diferencial em cada uma dessas etapas que fornece as características do cacau fino em relação aos demais tipos de cacau presentes no mercado, por ser um produto que exige um processamento diferenciado, seja pelo componente ambiental, por meio do “sistema cabruca”, ou pelo componente “tecnológico local”, já que muitas empresas adaptaram e desenvolveram seus próprios métodos, equipamentos e controles específicos de temperatura que desencadearam aprimoramentos no processo de fermentação e secagem, e conseqüentemente, na obtenção de amêndoas de qualidade (LIMA e SALES, 2015). A fermentação é umas das etapas mais importantes, devido a inicialização da formação dos precursores do sabor, cor e aroma, sendo desenvolvido por meio de reações bioquímicas envolvendo polifenóis, proteínas e açúcares. Assim, o tempo médio de fermentação varia entre 5 a 7 dias, não sendo recomendável que o tempo de fermentação esteja fora desta faixa de variação. O primeiro revolvimento da massa de cacau é feito após 48 horas com relação à configuração inicial da etapa, com auxílio de intervenção humana (trabalhador rural), promovendo assim, uma aeração e uniformização da massa. Desta forma, os demais revoltamentos são efetuados em sequência para os seguintes tempos: 72, 96, 120, 144 e 168 horas, até que a etapa de fermentação seja concluída (SALES e CANDIDA, 2016).

Tendo isto vista, este artigo apresenta 3 possíveis modelos alternativos para a etapa de fermentação, cujo o controle é automatizado, visando o mínimo de intervenção humana e uma maior eficiência com relação a distribuição de temperatura no interior da massa de cacau, já que a temperatura influencia diretamente nas reações bioquímicas e, conseqüentemente, nas características organolépticas da massa do cacau.

### **2. METODOLOGIA**

Com base nas teorias atuais, a condução de calor em materiais ocorre basicamente por meio de dois mecanismos: migração dos elétrons livres e vibração dos átomos livres no retículo cristalino. Sendo que a taxa de transferência de calor por condução devido aos efeitos da movimentação dos elétrons é mais significativa do que com relação à vibração dos átomos livres (KREITH e BOHN, 2003). Assim, o fenômeno de transferência de calor por condução pode ser analisado apenas como a migração de energia de partículas com maior nível de energia para partículas menos energizadas (INCROPERA et al., 2008).

Assim, a partir da Equação da difusão de calor, obtida com base em conceitos interligados ao volume de controle, conservação de energia e lei de Fourier, é largamente utilizada para a obtenção de campos de temperaturas considerando este fenômeno térmico. Com isso, utilizou-se basicamente a Eq. (1), configurada para coordenadas cilíndricas, com os seguintes parâmetros ( $r$ ,  $\phi$ ,  $z$ ), pois esta é a geometria do sistema adotada para os 3 modelos de fermentadores.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

onde  $T$  é o campo de temperatura,  $q$  a taxa de geração de energia,  $\rho$  a massa específica,  $c_p$  é o calor específico a pressão constante e  $t$  o tempo. Além das variáveis independentes  $r$ ,  $z$  e  $\phi$ .

Inicialmente, foi desenhado a geometria de 3 modelos diferentes de fermentador, sendo criado apenas em duas dimensões e com dimensões 100 vezes menores com relação ao modelo real, assim essas adaptações têm por finalidade otimizar a capacidade de exigência computacional utilizada para o experimento. Sendo assim, uma circunferência de raio igual à 0,6 mm, foi dividida em dois domínios iguais, domínio superior e inferior, representando 50% de massa de ar e 50% de massa de cacau, respectivamente. No domínio da massa de cacau há uma outra circunferência localizada em seu centro, com raio de 0,2 mm, que representa uma região que possui uma concentração de calor, no qual é responsável pelo aquecimento da massa de cacau no processo de fermentação, sendo denominada fonte. O primeiro modelo chamado de fermentador estático (Fig. 1), aplicou-se para o caso em que a massa de cacau se encontra estática no interior do fermentador. Já o segundo modelo possui as mesmas configurações do fermentados estático, exceto por haver uma frequência rotacional de  $1/1800 \text{ s}^{-1}$ , no sentido horário, que equivale a um revolvimento de  $360^\circ$  em um período de 30 minutos, desta forma, por apresentar esta característica este modelo foi denominado de fermentador rotativo, e por fim, o terceiro modelo, que possui uma configuração diferente, por conter centralizado no sentido do seu eixo axial um conjunto de hélices, que desta vez serão responsáveis por realizar o revolvimento da massa de cacau para a mesma frequência de rotação citada anteriormente, sendo chamado de fermentador com hélices rotativas (Fig. 2).

Figura 1. Modelo do Fermentador Estático e Rotativo (Próprio Autor)

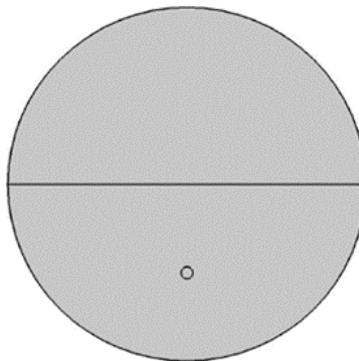
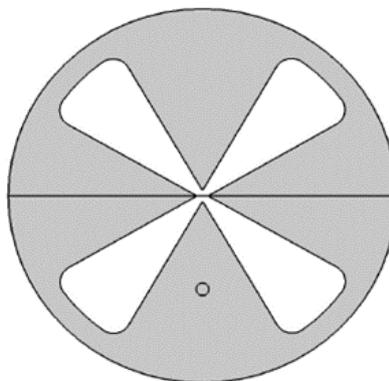


Figura 2. Modelo do Fermentador com Hélices (Próprio Autor)



Em seguida, a malha para cada modelo foi gerada, no qual o Fermentador Estático e Rotativo possui 1308 elementos com geometria triangular, possuindo 680 nós, já o fermentador com hélices possui 2381 elementos, com as mesmas geometrias, contendo 1347 nós. Cujo os modelos com a malha definida são apresentados na Fig. 3 e 4, respectivamente.

Figura 3. Malha para o Fermentador Estático e Rotativo (Próprio Autor)

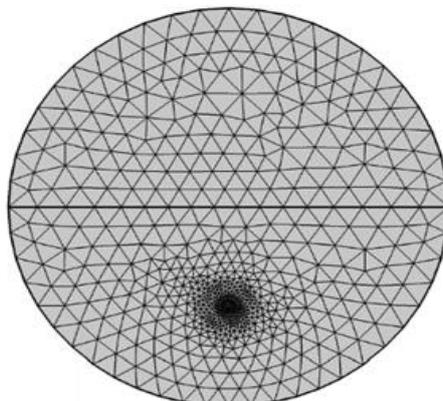
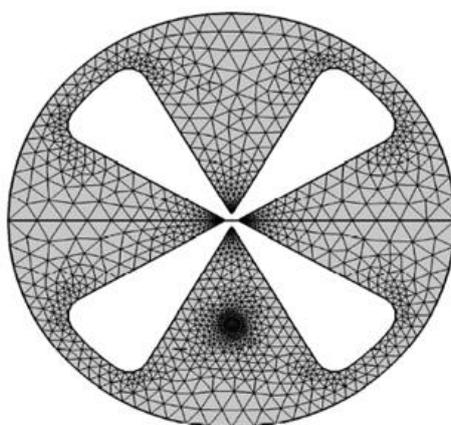


Figura 4. Malha para o Fermentador com Hélices (Próprio Autor)



Em seguida, o software CAE foi alimentado com os dados relacionados as propriedades físicas e as condições iniciais, de massa de ar e de cacau. No qual os valores estão apresentados na tabela a seguir:

Tabela 1. Propriedades e Condições Iniciais para a massa de Ar e de Cacau (Próprio Autor)

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\eta$ (Pa.s)	$k$ (W/m.K)	$C_p$ (KJ/kg.K)	T (°C)	$\alpha$ (mm <sup>2</sup> /s)
Ar	1,3	$18,5 \cdot 10^{-6}$	0,03	1,01	25	16
Cacau	1106,4	0,096	0,535	3,6	25	0,14

onde  $\rho$  é a massa específica,  $\eta$  é a viscosidade dinâmica,  $k$  é a condutividade térmica,  $C_p$  é o calor específico a pressão constante, T é a temperatura inicial na massa de ar e de cacau e  $\alpha$  é a difusividade térmica. Vale ressaltar que os dados apresentados para o ar são tabelados, já os valores para o cacau foram obtidos a partir de trabalho de Sales (SALES e Lima, 2018) e (Amigo et al. 2017).

Para a fonte centralizada na massa de cacau foi atribuído uma temperatura inicial de 32 °C, no qual tem o intuito de representar o início do processo de fermentação, que ocorre por meio da concentração de temperatura de forma pontual em diversos locais contidos na massa de cacau. Após a definição de todos estes parâmetros e condições, a simulação foi executada, onde analisou-se a distribuição de temperatura nos 3 modelos em um período de 30 minutos.

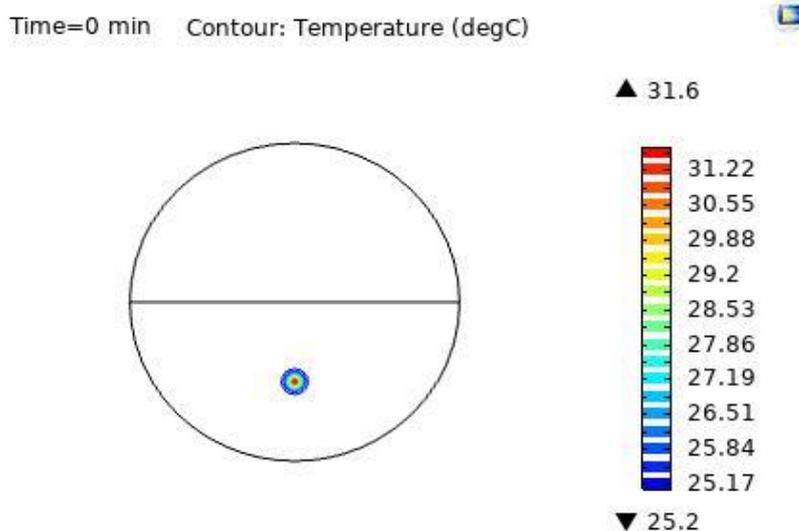
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As configurações dos 3 modelos de fermentadores foram analisados nos seguintes tempos: 0, 10 e 30 minutos. Assim, por questões de organização, os resultados para o fermentador estático, rotativo e com hélices rotativas serão apresentados em sequência.

### 3.1 Fermentador Estático

A Figura 5 mostra a distribuição das curvas isotérmicas no interior do fermentador, no instante inicial  $t = 0$  minutos. Assim, observa-se que há uma concentração de calor localizada no centro da massa de cacau, exatamente na posição em que a fonte se encontra, que foi escolhida neste determinado local por conveniência, para os três modelos de fermentador.

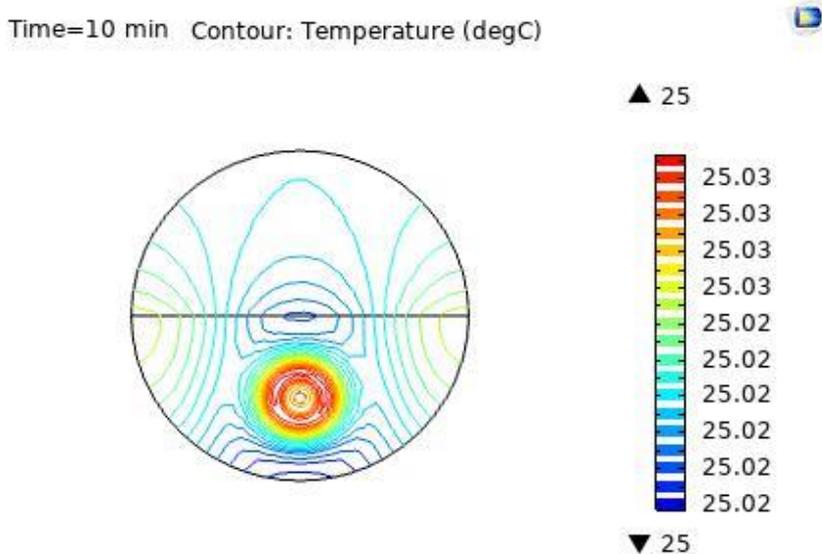
Figura 5. Fermentador Estático no instante inicial da fermentação (Próprio Autor)



Observando a Fig. 5 pode-se averiguar que o processo de transferências de calor da fonte para o restante da massa de cacau ao seu redor está começando, assim as regiões que apresentam coloração mais próxima do vermelho estão com uma temperatura mais elevada com relação às regiões com coloração mais próximas do azul. Os valores de máximo e mínimo presentes neste instante de tempo são  $31,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $25,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

A Figura 6 mostra as curvas isotérmicas de temperatura após um período de tempo de 10 minutos de fermentação. Assim, é evidente que o processo de propagação de calor da fonte para as regiões circunvizinhas não está ocorrendo de forma homogênea.

Figura 6. Fermentador Estático nos instantes de tempo de 10 min (Próprio Autor)

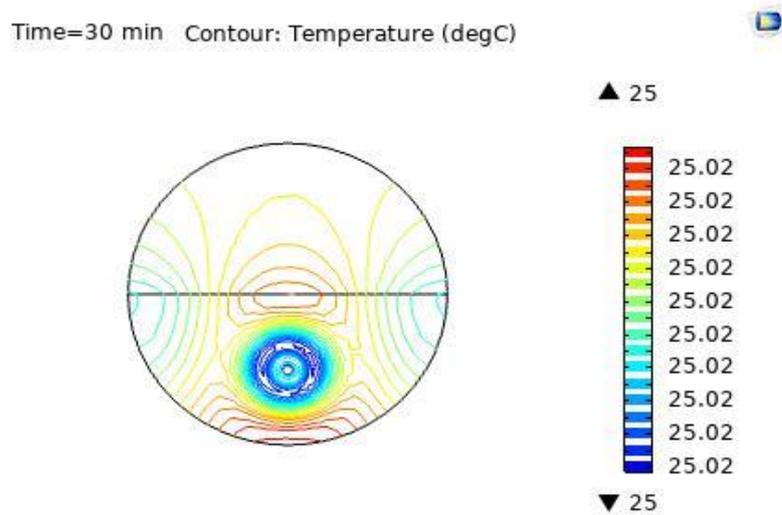


Assim, com base na Fig.6, observa-se que a temperatura das curvas isotérmicas abaixou consideravelmente, fato que é explicado pela diferença de massa entre a fonte e o restante da massa de cacau em que ela se encontra, com isso a

diferença de temperatura entre as curvas de temperaturas mais elevadas com relação às de menores temperaturas é ínfima, variando na escala dos centésimos. Mas mesmo assim, verifica-se que o calor é transferido da fonte para as regiões circunvizinhas de forma não uniforme, ainda havendo uma concentração de calor contida na fonte.

A Figura 7 apresenta a distribuição das curvas isotérmicas no interior do fermentador, no instante inicial  $t = 30$  minutos. Ainda assim, nota-se a não uniformização da distribuição de temperatura no interior do fermentados, além de observar o processo de resfriamento da fonte, que dissipou todo o calor contido nela para as outras regiões do fermentador.

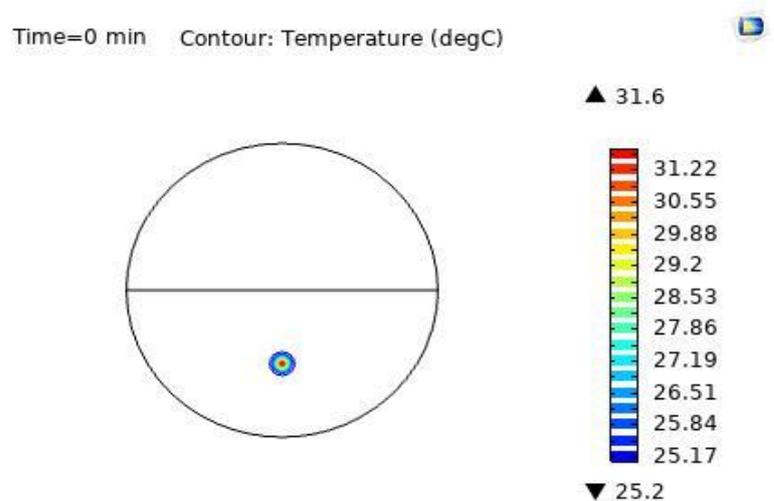
Figura 7. Fermentador Estático no instante de tempo  $t = 30$  minutos (Próprio autor)



### 3.2 Fermentador Rotativo

A Figura 8 apresenta os resultados para a distribuição das curvas isotérmicas no interior do fermentador rotativo no instante de tempo inicial, sendo que foram adotadas as mesmas configurações do fermentador estático, com exceção da presença de uma frequência de rotação constante de  $1/1800 \text{ s}^{-1}$ , ou seja, após 30 minutos a massa de cacau é totalmente revolvida.

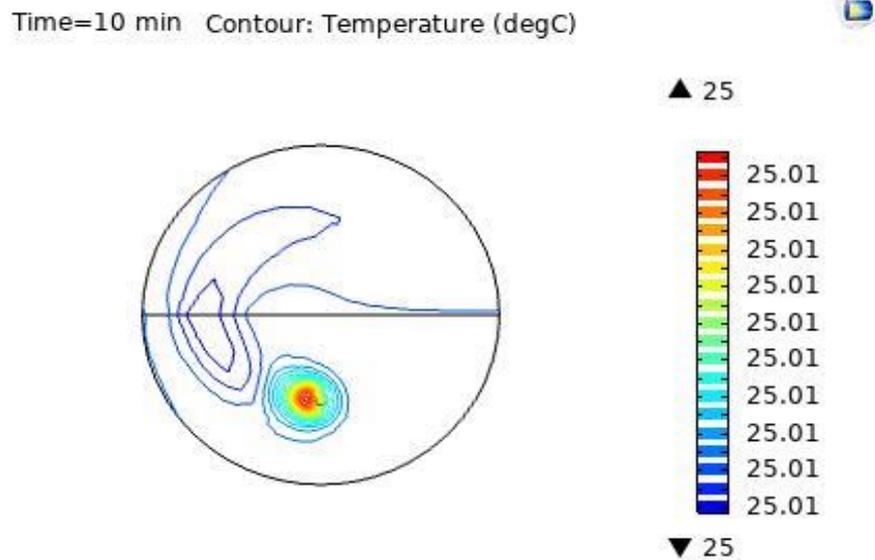
Figura 8. Fermentador Rotativo no instante de tempo  $t = 0$  min (Próprio Autor)



Pode-se observar que os resultados para o fermentador rotativo são iguais aos do fermentador estático no início do processo, já que no momento inicial não há a rotação do cilindro.

Em seguida, temos a Fig. 9, que apresenta o comportamento da distribuição das curvas isotérmicas no interior do fermentador rotativo no instante de tempo  $t = 10 \text{ min}$ .

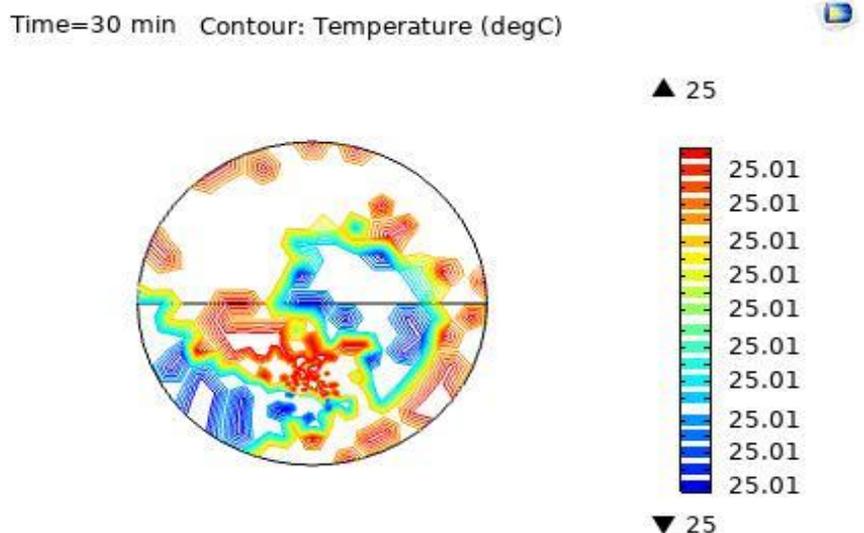
Figura 9. Fermentador Rotativo para um período de tempo de  $t = 10$  min (Próprio Autor)



Neste instante de tempo, o processo de transferência de calor entre a fonte e a região circunvizinha tende para a extremidade esquerda do cilindro. Esta movimentação é favorecida pela rotação do cilindro no sentido horário, que para  $t = 10$  min se encontra há um terço de completar o revolvimento ( $360^\circ$ ), ou seja, o fermentador se encontra com uma angulação de  $120^\circ$  com relação ao posicionamento inicial. Assim, as curvas isotérmicas estão tendendo a acompanhar a movimentação do fermentador.

Já a Fig. 10 apresenta a distribuição das curvas isotérmicas após 30 minutos do processo de fermentação, exatamente no momento em que a massa é totalmente revolvida, devido à finalização do movimento rotacional de  $360^\circ$ , em um período de tempo de 30 minutos.

Figura 10. Fermentador Rotativo para o instante de tempo de  $t = 30$  min (Próprio Autor)

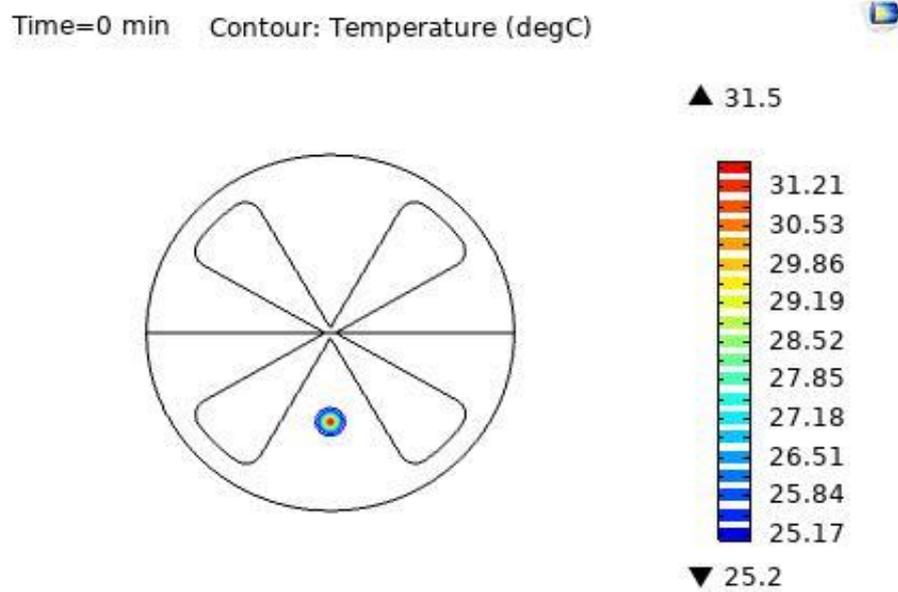


No instante final do processo de revolvimento para este modelo de fermentador, pode-se analisar que ocorreu um decréscimo significativo da temperatura, devido aos processos físicos convectivos e condutivos de transferência de calor no interior do fermentador. Nota-se também que apesar das diferenças de temperaturas serem pequenas, de modo que a escala em graus Celsius a direita não consegue captar, exibindo apenas uma temperatura constante de  $25,01^\circ\text{C}$  nas curvas isotérmicas, há uma distribuição de temperaturas relativamente homogênea, não apresentando regiões isoladas com temperaturas mais elevadas.

### 3.3 Fermentador com Hélices Rotativas

A Figura 11 contém os resultados relacionados ao comportamento da distribuição das curvas isotérmicas no interior do fermentador com hélices rotativas no início do processo fermentativo, possuindo as mesmas configurações do fermentador rotativo, exceto pela presença de 4 hélices que serão responsáveis por revolver a massa de cacau.

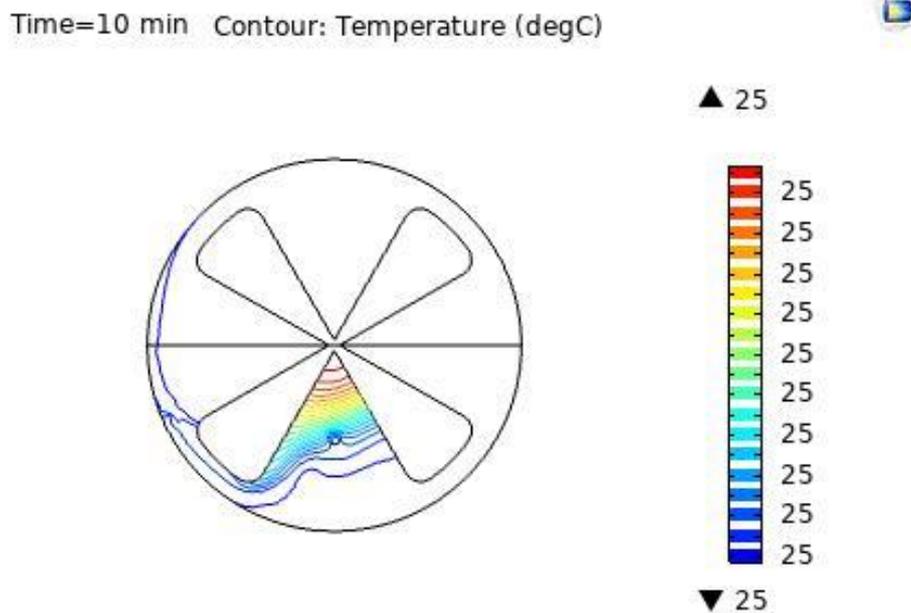
Figura 11. Fermentador com Hélices Rotativas no instante de tempo  $t = 0$  min (Próprio Autor)



Nota-se a partir da figura acima, que o comportamento das curvas isotérmicas para o início do processo neste modelo de fermentador é semelhante aos outros dois apresentados anteriormente, já que neste instante o fermentador está estático.

Posteriormente, encontra-se a Fig. 12, que possui os resultados para a distribuição das curvas isotérmicas no interior do fermentador com hélices rotativas no instante de tempo  $t = 10$  min.

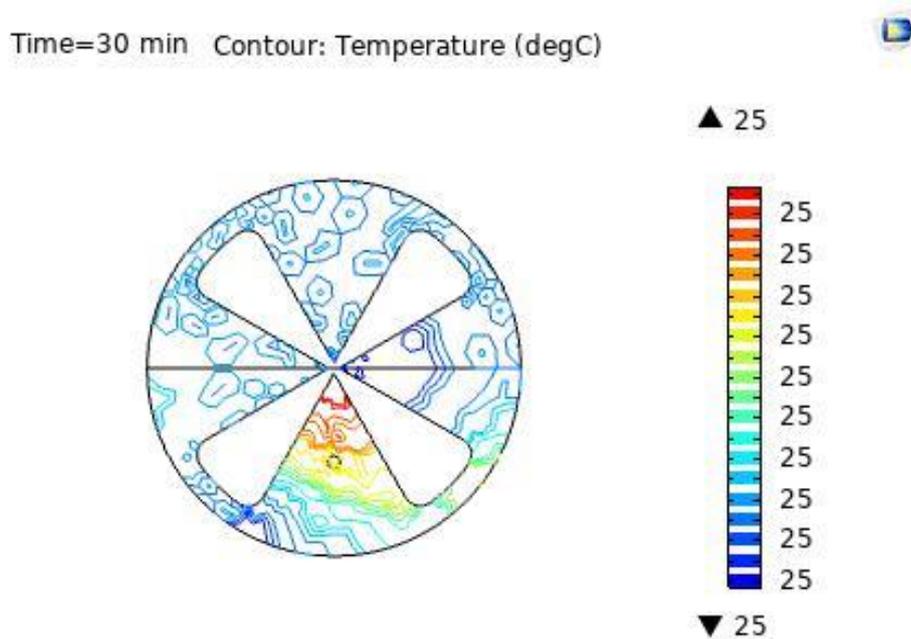
Figura 12. Fermentador com Hélices Rotativas em um instante de tempo  $t = 10$  min (Próprio Autor)



Com base na análise da Figura exposta acima, pode-se notar que a distribuição das curvas isotérmicas tende a acompanhar o movimento de rotação no sentido horário das hélices, além de haver um declínio gradual da temperatura de acordo com a aproximação das extremidades das hélices. Vale ressaltar que a escala de temperatura exposta a direita do modelo apresenta uma temperatura constante de  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , porém ocorre uma variação na coloração, onde o vermelho equivale as curvas mais quente e o azul as curvas mais frias. Assim, como a diferença destas temperaturas é muito pequena não se consegue expressar por meio da escala, já que o modelo foi reduzido com relação ao seu tamanho original.

A Figura 13 expõe os resultados do comportamento da distribuição das curvas isotérmicas após 30 minutos do processo de fermentação, no momento em que a massa é totalmente revolvida, devido à finalização do movimento rotacional das hélices que realizam um giro de  $360^{\circ}$ , em um de tempo de 30 minutos.

Figura 13. Fermentador com Hélices Rotativas no instante de tempo  $t = 30\text{ min}$  (Próprio Autor)



Analisando a Figura apresentada acima, pode-se observar que ainda há uma região de concentração de temperatura localizada entre as duas hélices inferiores, cuja a temperatura aumenta de acordo com a aproximação do centro do eixo axial das hélices. Além disso, avalia-se que ocorreu uma dissipação do calor da fonte para o restante da massa de cacau de maneira relativamente uniforme.

#### 4. CONCLUSÕES

A partir dos três modelos de fermentador apresentados neste artigo, sendo que o fermentador de cacau rotativo é mais efetivo que o fermentador estático, ou seja, mais eficiente que o método tradicional utilizado atualmente na região sul da Bahia. Comprovou-se também que, o fermentador com hélices ao longo do seu eixo axial não é tão eficiente devido à dissipação de calor da massa de cacau com o ar, durante a rotação das hélices.

O fermentador cilíndrico rotativo apresenta uma maior uniformidade nas distribuições de temperatura e também potencializou a proliferação do calor concentrado na fonte da massa de cacau para regiões subjacentes, que posteriormente implica em uma uniformização do calor para o restante sistema. Assim, como a distribuição de temperatura no interior do fermentador de cacau influencia diretamente nos precursores do sabor do produto final (derivados do cacau), com o fermentador rotativo, será possível conseguir amêndoas de cacau mais finas, com relação ao processamento, assim possuindo um determinado controle dos precursores de sabor.

#### 5. AGRADECIMENTOS

J.H.S agradece a Fapesb-PIE0013-2016 e ao CNPq-315519/2018-5. M.B.C.F. agradece ao CNPq- 800339/2018-5.

#### 6. REFERÊNCIAS

- INCROPERA, DeWitt, Berganan, Lavine; Fundamentos de transferência de calor e de massa. 6ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 2008.
- LIMA, G. P. A.; SALES, J. H.. Sistema alternativo para secagem de cacau e geração de energia. Revista GEINTEC: gestão, inovação e tecnologias, v. 5, p. 1703-1715, 2015.
- SALES, J. H.; CANDIDA, T.. Efeito da Temperatura Sobre a Amêndoa de Cacau: Secador Vertical. Revista GEINTEC, v. 6, p. 3437-3446, 2016.
- KREITH, F. BOHN, M. PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR, 6ed. São Paulo: Thomson, 2003.

## **7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES**

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.