



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA

PAULO RICARDO SILVA MARTINEZ

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM CONTROLADOR  
PID PARA TEMPERATURA EM GRÃOS DE MILHO**

CAMPINAS

2021



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA

PAULO RICARDO SILVA MARTINEZ

## **SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM CONTROLADOR PID PARA TEMPERATURA EM GRÃOS DE MILHO**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Agrícola à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

Orientador: Angel Pontin Garcia

CAMPINAS

2021

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

M366s Martinez, Paulo Ricardo Silva, 1993-  
Simulação computacional de um controlador PID para temperatura em grãos de milho / Paulo Ricardo Silva Martinez. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Angel Pontin Garcia.  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Milho. 2. Milho - Processamento. 3. Milho - Secagem. 4. Simulação computacional. 5. Gão - Secagem. I. Garcia, Angel Pontin, 1978-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações adicionais, complementares

**Título em outro idioma:** Computer simulation of a PID controller for temperature in corn kernels

**Palavras-chave em inglês:**

Corn

Corn - Processing

Corn - Drying

Computational Simulation

Grain - Drying

**Titulação:** Engenheiro Agrícola

**Banca examinadora:**

Rafael Augustus de Oliveira

Claudio Kiyoshi Umezu

**Data de entrega do trabalho definitivo:** 21-01-2021



# **SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM CONTROLADOR PID PARA TEMPERATURA EM GRÃOS DE MILHO**

Paulo Ricardo Silva Martinez

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Angel Pontin Garcia  
Orientador

---

Prof. Dr. Rafael Augustus de Oliveira

---

Dr. Claudio Kiyoshi Umezu

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais, irmão, familiares e amigos que me apoiaram neste trajeto. E para todos aqueles que de alguma forma fizeram parte dessa jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, a Deus. E à minha família, meu pai Valdinei, minha mãe Irani e meu irmão Luís, e minha grande amiga Luciane, que sempre me deram forças e foram meu alicerce durante esta jornada. Agradeço também aos meus amigos e colegas da FEAGRI, que fizeram parte da minha caminhada e que seguimos unidos.

Ao meu professor orientador Angel Pontin Garcia, que auxiliou, aconselhou, para que esse trabalho saísse da melhor forma e sempre esteve de prontidão para ajudar no que fosse necessário. E a Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP), que com todos os seus professores, mestres, doutores, colaboradores e amigos, puderam me fornecer toda a base para o crescimento pessoal e profissional.

## RESUMO

O cultivo de grãos é de extrema importância em todo mundo, seja em qualquer cadeia produtiva, e sua demanda cresce a cada ano, e é necessário aumentar a produtividade de maneira eficiente e com menor impacto socioambiental. A cadeia produtiva pós-colheita é uma grande responsável pela qualidade e por garantir que este grão chegue com a melhor qualidade e menores perdas possíveis. Entretanto, faz-se necessário utilizar de equipamentos e energia para garantir esta qualidade, entre eles o processo de secagem é um dos principais, não apenas pelo tamanho, mas pela criticidade e também pelo alto consumo energético.

A empregabilidade de tecnologia desenvolvida na indústria para o campo está em voga, nos últimos anos, porém faz-se necessário o desenvolvimento e adaptabilidade visto que são ambientes completamente diferentes e não necessariamente são as mesmas soluções.

Tendo em vista este cenário e as demandas futuras, este projeto teve como objetivo a simulação computacional de um controlador PID para um secador de grãos, visando a otimização do processo, como otimização energética e redução de custos com mão de obra e perdas durante o processo de secagem.

A partir das simulações feitas em cada etapa, foi possível observar os ganhos e melhoramentos do sistema que, com a implementação de um controlador PID, evidenciam que o processo ainda é uma lacuna.

**Palavras chave:** Controle; modelagem; secagem; secador de grão.

## ABSTRACT

Grain cultivation is extremely important worldwide in any production chain, and its demand grows every year, so it is necessary to increase productivity efficiently and with less socio-environmental impact. The post-harvest production chain is largely responsible for quality and for ensuring that this grain arrives with the best quality and the lowest possible losses, however, it is necessary to use the equipment and energy to guarantee this quality. Among them, the drying process is one of the main ones, not only for its size, but for its criticality and also for its high energy consumption.

The employability of technology developed in the industry for the field has been in vogue in recent years, but development and adaptability are necessary since they are completely different environments and are not necessarily the same solutions.

In view of this scenario and future demands, this project aimed at the computer simulation of a PID driver for a grain dryer, qualified to optimize the process, such as energy optimization and reduced labor costs and losses during the process drying.

From the simulations carried out at each stage, it was possible to observe the gains and improvements of the system, which, with the implementation of a PID driver, show that the process is still a gap.

**Keywords:** Control; modelling; drying; grain dryer.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>10</b>
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>10</b>
<b>3.1.</b>	<b>Modelo empírico adotado</b>	<b>10</b>
<b>3.2.</b>	<b>Controlador Proporcional Integral Derivativo - PID</b>	<b>10</b>
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>11</b>
<b>4.1.</b>	<b>Modelo do processo de secagem para milho</b>	<b>11</b>
<b>4.2.</b>	<b>Dinâmica de secagem</b>	<b>13</b>
<b>5.</b>	<b>DISCUSSÃO E RESULTADO</b>	<b>15</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>25</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>26</b>
<b>8.</b>	<b>APÊNDICE</b>	<b>28</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Os grãos são de extrema importância para a economia mundial, pois são utilizados em diversas etapas de cadeias produtivas distintas, desde alimento para animais à geração de energia através de seus derivados (Brooker et al., 1992).

O processo de secagem visa diminuir a quantidade de água nos grãos e assim garantir a qualidade e maior tempo de armazenamento dos grãos, e também viabilizando colheitas em períodos aos quais estes não encontram-se com a umidade ideal.

A secagem de grãos, no Brasil, ainda possui muitas lacunas, do ponto de vista de eficiência, grande parte dos equipamentos utilizados são operados de forma manual, o que garante grande suscetibilidade à erros e gastos. Segundo Cavalcanti (1999), os gastos energéticos referentes ao processo giram em torno de 12% da energia total do sistema de beneficiamento pós-colheita. E o processo pode durar horas e, em casos mais extremos, até dias (Dalpasquale et al., 2010).

Para isso, como sugerido por Dantas et al. (2011), é necessário o conhecimento de todo o processo de secagem e desenvolvimento de programação do modelo, afinal o modelo matemático fará a simulação de todo o processo, sendo ele responsável pelas respostas do sistema, garantindo que o resultado seja alcançado de maneira satisfatória.

Portanto, os estudos para melhoria do processo são de grande valia para otimização de recursos, mas podem demorar muito tempo para serem analisados. Neste ponto, a simulação matemática permite obter valores próximos aos reais porém em um tempo muito menor e de forma mais econômica.

Assim sendo, o objetivo deste projeto é a simulação do controle de temperatura do processo de secagem de grãos de milho, visando o aperfeiçoamento do processo de forma automatizada, reduzindo custos e otimizando esforços.

## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho, teve como principal objetivo, analisar o comportamento da temperatura, ao longo do tempo, no processo de secagem de grãos, de forma a mantê-la fixa adequando-a com tempo de resposta do sistema, de forma a melhorar seu desempenho e otimizar recursos.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. Modelo empírico adotado

Os modelos empíricos são adotados muitas vezes por serem menos complexos que os modelos matemáticos e também pela falta de confiabilidade quanto aos dados utilizados (Borges, 2016). A escolha do método fez-se em função do desenvolvimento para o grão de milho, sendo um modelo bem sucedido para a atividade, segundo Doymaz (2005). E também sua equação, visando um sistema de primeira ordem, para uma modelagem menos complexa.

Para o desenvolvimento do projeto com grãos de milho, optou-se pelo modelo de Henderson & Pabis, obtido de maneira empírica, conforme a equação 1 (Diamante et al., 2010):

$$RU = a \times \exp(-b \times t) \quad (1)$$

em que, RU: é a razão de umidade;  
a e b: são coeficientes do modelo;  
t: tempo (em minutos).

### 3.2. Controlador Proporcional Integral Derivativo - PID

O controle proporcional integral derivativo é a combinação das ações de cada um destes ganhos, que unidos através de um único controle é capaz de proporcionar respostas rápidas, controle de estabilidade e um baixo erro de regime permanente (Bezerra, 2007).

Garcia (2017) cita como objetivo do controlador PID a estabilidade da variável controlada, de forma a atuar no sistema para minimizar os erros ao longo do tempo. E que, ainda nos dias atuais, é a tecnologia de controle mais utilizada nas indústrias, devido à simplicidade e versatilidade do sistema.

Ainda segundo o autor, já existem diversos métodos para realizar a sintonia de campo do controlador PID, teorias criadas para obtermos uma estimativa e economia de tempo, visto que em alguns processos de controle, esta parametrização pode levar mais tempo que o esperado. Porém ainda assim é possível realizar esta sintonia de maneira “tentativa e erro”.

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1. Modelo do processo de secagem para milho**

Para o desenvolvimento do projeto foi necessário a modelagem do comportamento da secagem do milho pelo modelo de Henderson & Pabis, pela utilização da equação (1). Aplicando a transformada de Laplace, obtém-se a equação (2).

$$RU(s) = \frac{a}{s + b} \quad (2)$$

Com os dados propostos por Borges (2016), foi possível desenvolver a equação do processo de secagem, identificando o comportamento dos coeficientes a e b, para diversas temperaturas, conforme a tabela 1.

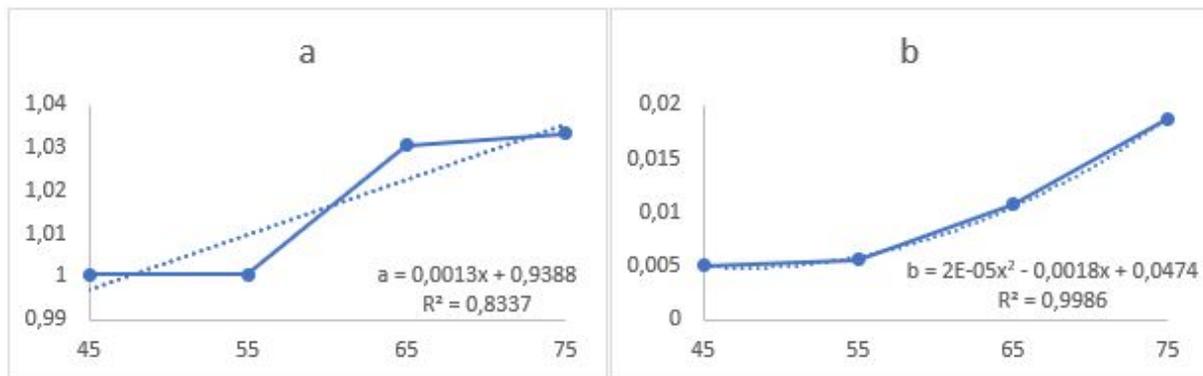
A partir dos coeficientes da tabela 1, fez-se um ajuste matemático, visando estimar os coeficientes intermediários entre as temperaturas analisadas por Borges, ou seja, estimando o comportamento dos coeficientes em função da temperatura.

Para finalizar o modelo do processo, construíram-se os gráficos da figura 1, para cada coeficiente e identificaram-se as linhas de tendência para cada coeficiente e sua equação característica. A escolha dos modelos, linear para o coeficiente a e polinomial de segunda ordem para b, deu-se pelos coeficientes de determinação ( $R^2$ ).

**Tabela 1** - Coeficientes do modelo Henderson & Pabis, proposto por Borges (2016).

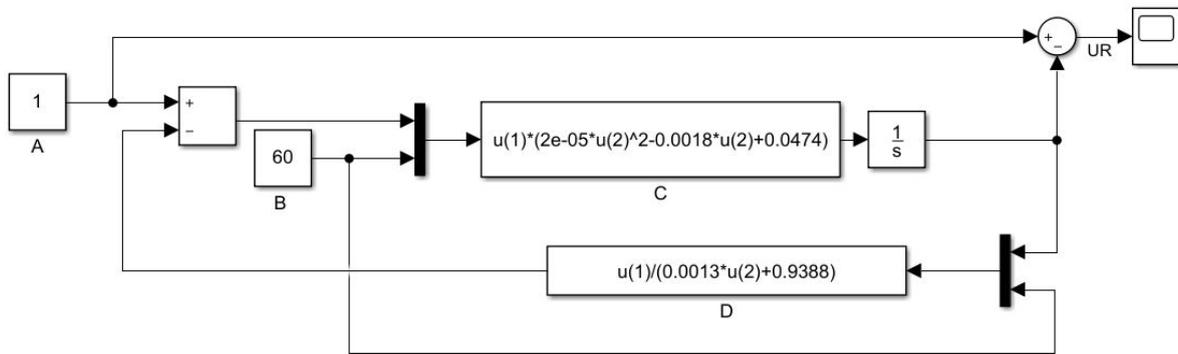
T (°C)	a	b	R <sup>2</sup>
45	1,0005	$5,0684 \times 10^{-3}$	0,99962
55	1,0005	$5,5776 \times 10^{-3}$	0,99953
65	1,0306	$1,0741 \times 10^{-2}$	0,99616
75	1,0335	$1,8736 \times 10^{-2}$	0,99254

Para o coeficiente a, testaram-se outros modelos, porém manteve-se o R<sup>2</sup> igual a 0,83 , então, o modelo linear, por ser mais simples foi escolhido. Já para o coeficiente b, o modelo polinomial de segunda ordem obteve um R<sup>2</sup> acima de 0,99.



**Figura 1** - Gráfico dos coeficientes da equação proposta por Diamante et al. (2010), com seus respectivos modelos e R<sup>2</sup>.

Com o modelo definido, foi realizado o desenvolvimento e a simulação do processo, com o software do MATLAB Simulink®, conforme a figura 2. A comparação das curvas obtidas por Borges (2016) aos obtidos pela simulação do modelo foram satisfatórias.



**Figura 2** - Diagrama de blocos da dinâmica de secagem, onde: A: taxa inicial de umidade do grão; B: temperatura do ar de secagem; C: coeficiente b como ganho da função; D: coeficiente a como resistência da função.

## 4.2. Dinâmica de secagem

Para modelar o comportamento da secagem dos grãos, utilizou-se o balanço de energia, desprezando as perdas de energia por dissipação para o meio, conforme a equação 3.

$$\Phi_{sec} = \Phi_s + \Phi_{ar} + \Phi_{lat} \quad (3)$$

em que,  $\Phi_{sec}$  : fluxo de calor fornecido pelo aquecedor, em kcal min<sup>-1</sup>;  
 $\Phi_s$  : fluxo de calor absorvido pelo grão, em kcal min<sup>-1</sup>;  
 $\Phi_{ar}$  : fluxo de calor absorvido pelo ar, em kcal min<sup>-1</sup>;  
 $\Phi_{lat}$  : fluxo de calor latente de vaporização da água dos grãos de milho, em kcal min<sup>-1</sup>;

Pode-se substituir as quantidades de calor da equação 3, pela equação de calorimetria, para cada meio. Assim, tem-se,

$$\Phi_s = \bar{m}_{milho} \times c_{milho} \times (T_f - T_i) \quad (4)$$

em que,  $m_{milho}$  : fluxo mássico de milho, em kg min<sup>-1</sup>;

$c_{\text{milho}}$  : calor específico do milho, em kcal kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>

$T_f$  : temperatura após a secagem, em °C;

$T_i$  : temperatura inicial, em °C;

Para o processo, adotou-se o fluxo mássico de milho de 433 kg min<sup>-1</sup>, para o calor específico para o grão de milho, foi utilizado a média da equação proposta por Andrade et al (2004), considerando a variação do teor de umidade, entre 8,6% a 17,1%, obtendo-se o valor de 1.342,0192 J kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>, ou 0,3208 kcal kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>, e considerou-se uma temperatura ambiente do grão de 30 °C.

Para o ar, também utilizou-se a equação de calorimetria, como proposta na equação 5, visando as adequações para o sistema.

$$\Phi_{ar} = \bar{m}_{ar} \times c_{ar} \times (T_f - T_i) \quad (5)$$

em que,  $m_{ar}$  : fluxo mássico de ar, em kg min<sup>-1</sup>;

$c_{ar}$  : calor específico do ar, em kcal kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>

$T_f$  : temperatura após a secagem, em °C;

$T_i$  : temperatura inicial, em °C;

O fluxo mássico de ar para o sistema foi adotado como 952 kg min<sup>-1</sup>, para o calor específico do ar utilizou-se o valor de 0,24 kcal kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>.

Para quantificar o calor latente do produto, utilizou-se a equação proposta por Correa et al. (1998), como mostra a equação 6.

$$L = (2502,2 - 2,39 \times T_f) \times (1 + 0,5307 \times \exp(-12.3579 \times U_f)) \quad (6)$$

em que,  $L$  : calor latente de vaporização da água do produto, em kJ kg<sup>-1</sup>;

$U_f$  : umidade do grão após a secagem, em decimal.

Assim, temos pela equação de calorimetria que,

$$\Phi_{lat} = \bar{m}_{agua} \times L \times c \quad (7)$$

em que,  $m_{agua}$  : fluxo mássico de água, em kg min<sup>-1</sup>;  
 $c$  : coeficiente de conversão energética, de kJ para kcal.

Assim, adotou-se a diferença entre a umidade inicial e a final do grão de 4%, e o coeficiente de conversão energética utilizado foi de 0,239006. O fluxo mássico de água foi possível calcular pela proporção de perda de água multiplicado pelo fluxo mássico de milho. Assim foi possível mensurar o fluxo energético devido ao calor latente de vaporização para o produto.

### 4.3. Especificações do controlador PID

Para garantir o controle e a qualidade dos grãos durante o processo de secagem, adotaram-se alguns parâmetros, o controlador PID, conforme a tabela 2.

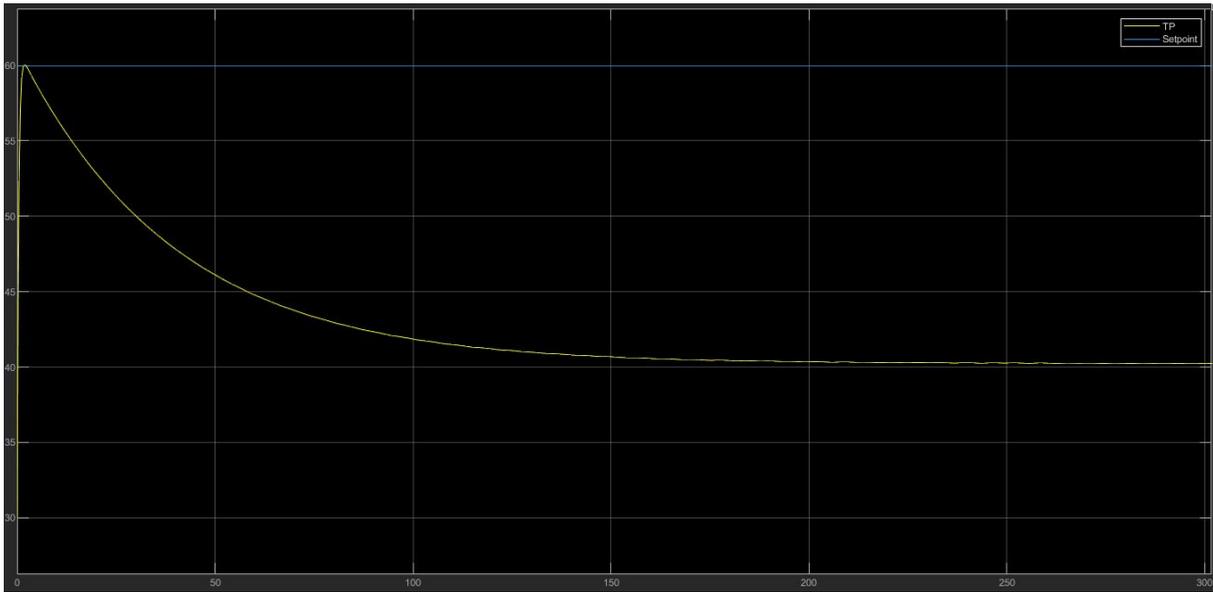
**Tabela 2** - Parâmetros de controle para o processo.

Erro regime	Tempo estabilização	Sobressinal máximo	Demanda energética estabilizada
0,5 %	400 min	1 %	11.500 kcal min <sup>-1</sup>

## 5. DISCUSSÃO E RESULTADO

Após a definição de todos os objetivos e metodologias de trabalho, foi necessário, entender a complexidade dos dados, para que a modelagem do sistema de controle fosse atendida da melhor maneira. Conforme foi descrito na metodologia, foram analisados os itens que compõem o sistema de forma individual, e assim definidos seus respectivos ganhos, assim como sugerido por Seborg et al (2010).

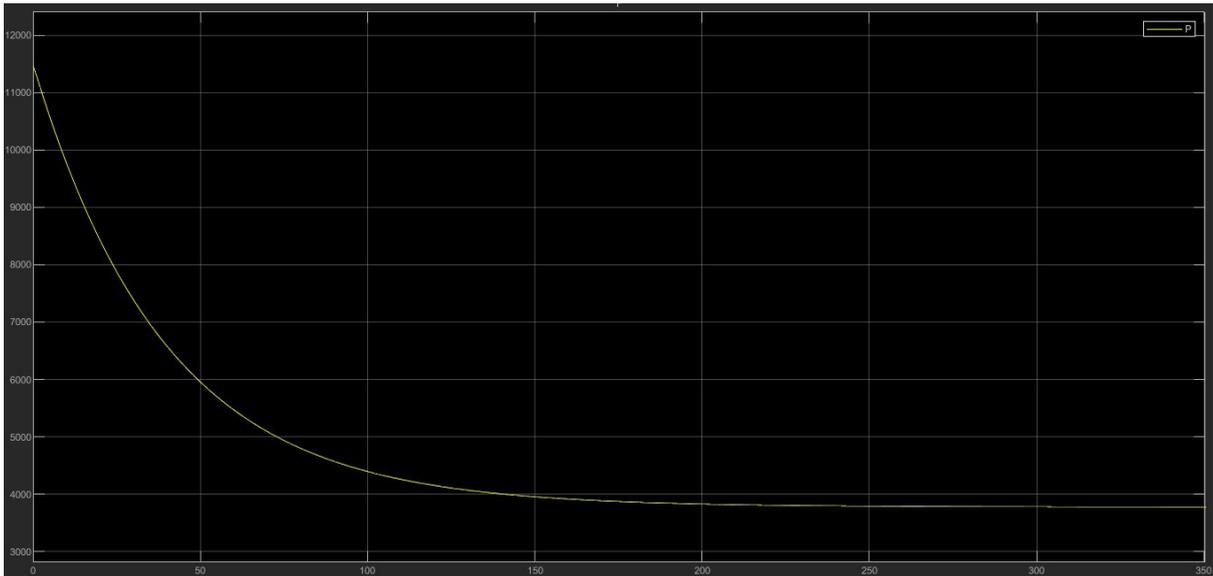




**Figura 4** - Resposta do sistema com ganho proporcional (P), temperatura x tempo.

Com o ganho P, a temperatura não mantém-se fixa no *setpoint*, fez-se as simulações para que fosse mantida a temperatura em torno do setpoint, porém o *overshoot* seria na casa dos 300 °C. Comportamento típico para o ganho proporcional, no qual há um pico e depois ocorre o equilíbrio do sistema.

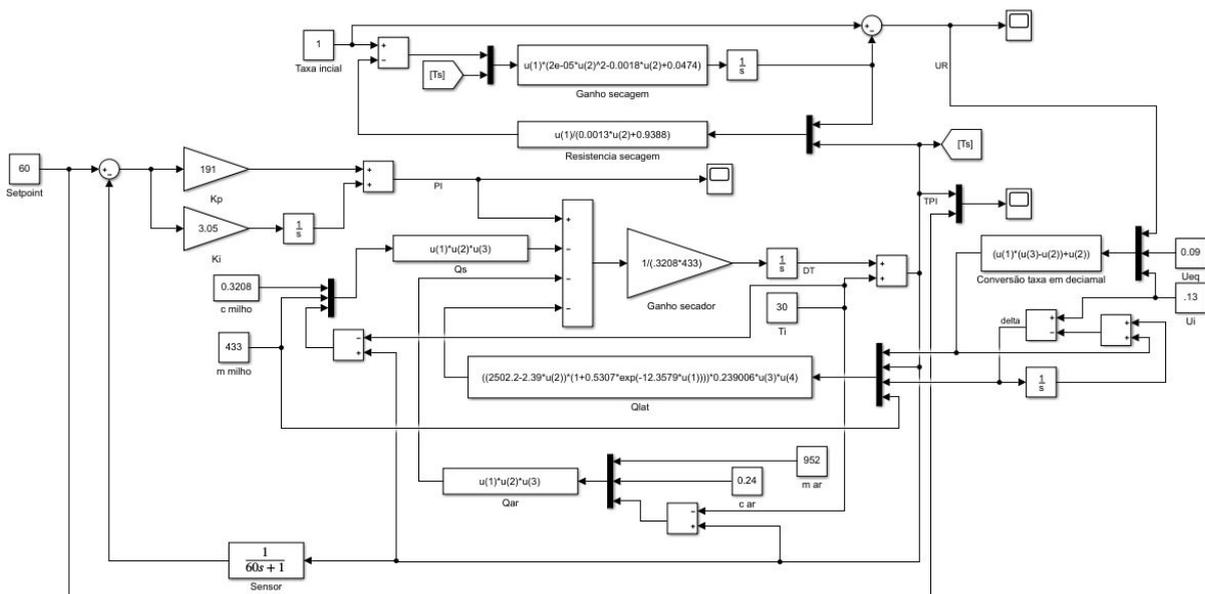
Também avaliou-se o desempenho da quantidade de calor fornecida pelo secador, figura 5, sendo um ponto de controle para que haja aproveitamento energético. É possível notar que o secador inicia com um fornecimento de potência alto e após 300 minutos ocorre uma estabilidade do sistema, porém lembra-se que não há o equilíbrio em torno da variável controlada.



**Figura 5** - Quantidade de calor fornecida pelo secador no sistema P, kcal x minutos.

Portanto, para manter a temperatura no *setpoint*, com o coeficiente do ganho proporcional conhecido, incrementou-se o ganho integral (I), visando uma aproximação à temperatura de *setpoint* definida, conforme figura 6.

A definição do valor do ganho, foi definida da mesma maneira que o ganho proporcional, porém com menos tentativas, visto que com variações pequenas havia uma grande variabilidade na resposta do sistema.



**Figura 6** - Diagrama de blocos com ganho proporcional integral (PI).

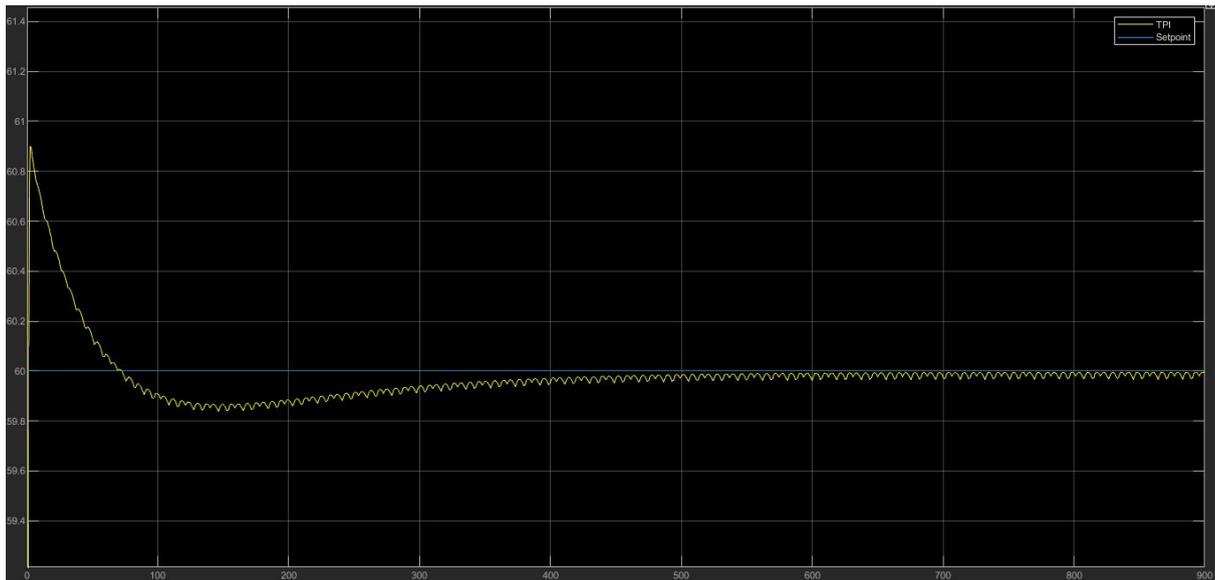
Com o ganho integral, nota-se uma aceleração quanto ao tempo de resposta para atingir a temperatura de 60 °C, entretanto, em virtude da economia de tempo, ocorre um sobressinal de 1,5 % do valor de *setpoint*, como mostra a figura 7.

Esta ainda retrata uma boa resposta ao sistema que, apesar das oscilações, mostrou uma variação máxima de 0,9 °C, e em campo, existem sistemas que, como operados de forma manual, apresentam variações maiores que esta, com frequência.



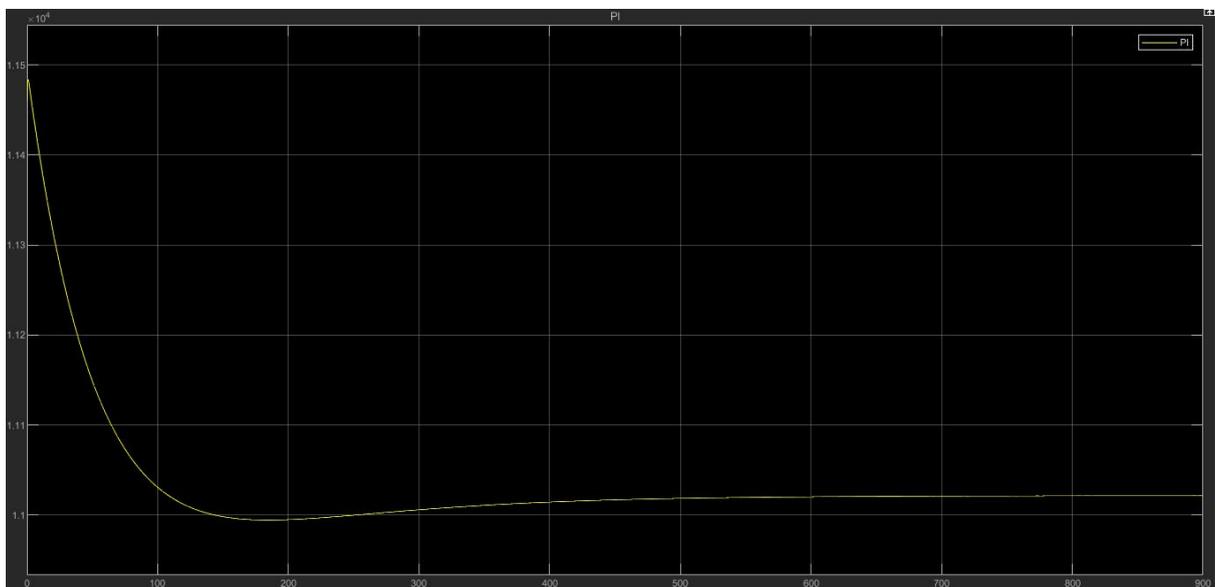
**Figura 7** - Resposta do sistema com ganho PI, temperatura x tempo.

A calibração do ganho integral, de maneira minuciosa, atingiu uma resposta muito satisfatória para o sistema, visando minimizar ao máximo o erro em regime do sistema P, ainda que haja um sobressinal, ele é satisfatório, mas ainda há uma instabilidade do sistema, conforme a figura 8



**Figura 8 - Zoom na resposta do sistema com ganho PI.**

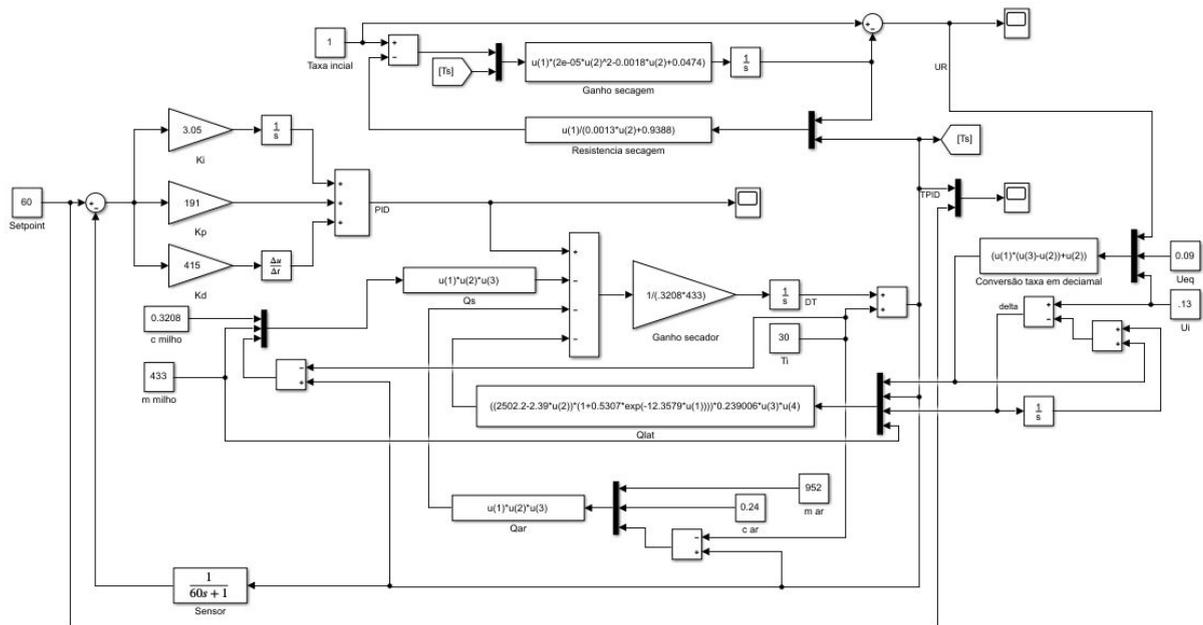
Quando avaliamos a demanda energética do sistema, pela quantidade de calor fornecida pelo secador, conforme figura 9, o consumo aumentou frente ao sistema com apenas ganho proporcional, mas este fator é explicado pela temperatura de equilíbrio bem próxima ao *setpoint*, conforme ilustrado na figura 7.



**Figura 9 - Quantidade de calor fornecida pelo secador no sistema PI.**

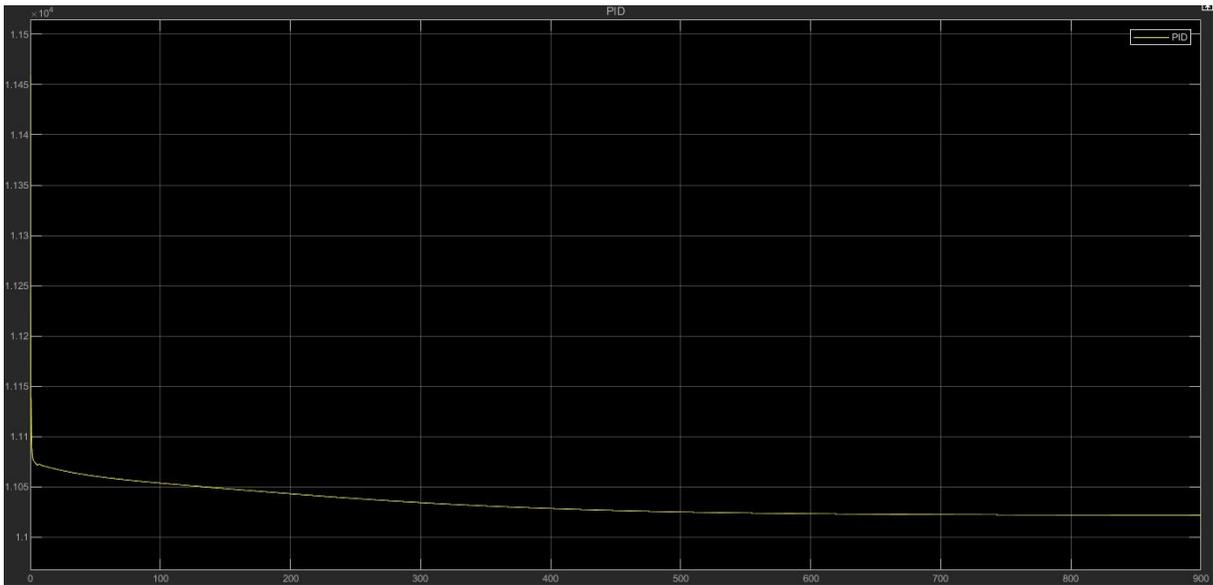
O último incremento no sistema foi o ganho derivativo, figura 10, este responsável por minimizar o erro em regime, porém também o ganho com maior complexidade quanto à sintonia de valores.

Seu ganho foi extremamente alto devido às respostas do sistema, diferentemente dos outros ganhos, neste caso, foi necessário analisar as respostas dos ganhos para encontrar a grandeza do valor do ganho derivativo. Isto porque a metodologia de tentativa e erro começou a ser dispendiosa demais.



**Figura 10** - Diagrama de blocos com ganho proporcional integral derivativo (PID).

A figura 11, mostra o desempenho do secador durante o processo e, apesar de, quando comparado à demanda energética do sistema PI, não demonstrar grande diferença, ainda assim há uma redução do consumo energético. E a temperatura, o erro em regime e o sobressinal são fatores positivos quanto à sua implementação.



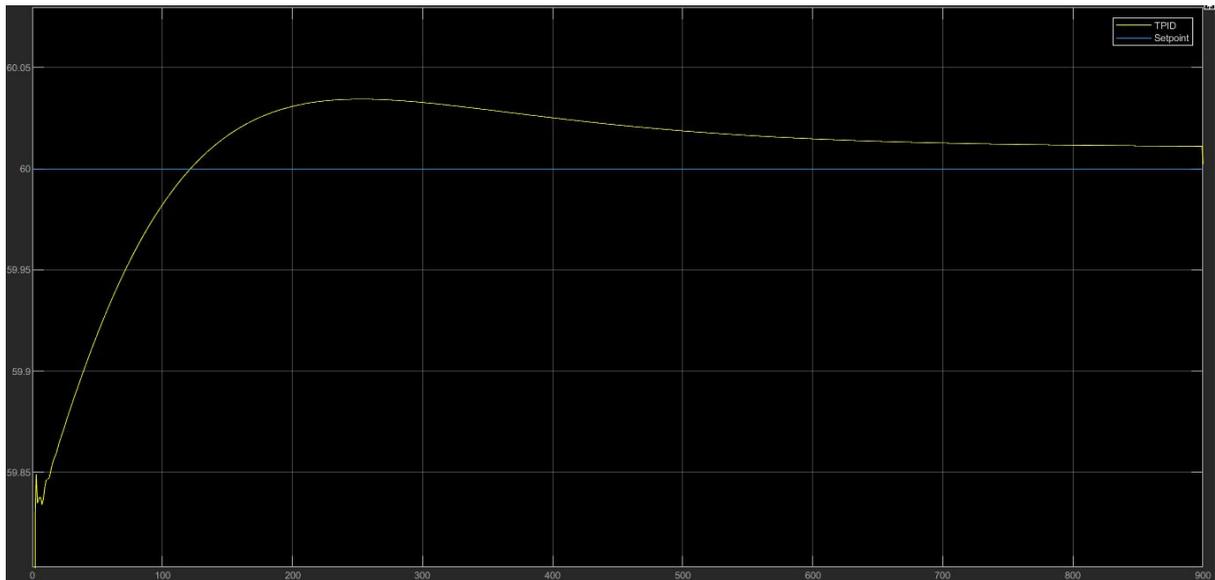
**Figura 11** - Quantidade de calor fornecida pelo secador no sistema PID.

A figura 12 mostra como foi o comportamento da variável de controle do sistema e seu comportamento deve ser fortemente considerado como indicador de melhoria frente aos outros sistemas.



**Figura 12** - Resposta do sistema com ganho PID, temperatura x tempo.

Na figura 13, é possível notar o *overshoot* do sistema e seu erro em regime, que foram 0,058% e 0,02 %, respectivamente. Concluindo-se que, com o sistema PID há o alcance de temperatura e a demanda energética foi mais eficiente.



**Figura 13** - Zoom na resposta do sistema com ganho PID.

A figura 14 nos mostra o comparativo do desempenho dos 3 sistemas, sendo notório o desempenho do sistema com controlador PID frente aos outros, quanto no controle da temperatura, garantindo a qualidade dos grãos, e na demanda energética. Ainda que, o sistema com controlador PI também obteve resultados satisfatórios quanto às simulações, com curvas muito próximas ao sistema com controlador PID.



**Figura 14** - Comparação entre os 3 sistemas quanto à quantidade de calor e a temperatura final do processo.

Com os resultados obtidos, construiu-se a tabela 3, para cada controlador e seus respectivos coeficientes, vale ressaltar que, mesmo com o maior tempo de estabilização, o sistema com controlador PID obteve resultados satisfatórios para com o tempo de secagem, sendo seu erro em regime, a metade do erro em regime para o sistema com controlador PI, para o tempo de 800 minutos.

**Tabela 3** - Resultados obtidos para o sistema, com os diferentes tipos de controle.

Controlador	Erro regime	Tempo estabilização	Sobressinal máximo	Demanda energética estabilizada
P	19,70 °C	400 min	0,025 °C	3.800 kcal min <sup>-1</sup>
PI	0,033 °C	800 min	0,900 °C	11.000 kcal min <sup>-1</sup>
PID	0 °C	1600 min	0,035 °C	11.000 kcal min <sup>-1</sup>

## 6. CONCLUSÃO

Visto que a automação já é uma realidade em diversas indústrias, até mesmo em processos do agronegócio, é necessário compreender os fatores que influenciarão durante o processo para que a atividade seja cada vez mais eficiente e possa tornar a atividade mais rentável, minimizando erros humanos, diminuindo o tempo de secagem e a variação da temperatura ao longo do processo.

Portanto, é nítido que o controle automatizado durante o processo impactará de forma positiva o processo de secagem. O aumento de temperatura pode causar danos irreversíveis à qualidade do grão, e a baixa temperatura torna o processo mais demorado, andando na contra mão frente à eficiência. Assim é notório a importância de um bom planejamento e dimensionamento do processo de secagem, para que os custos sejam mínimos.

A instalação do controlador PID para controle de temperatura auxiliará certamente na eficiência energética e na redução de custos com mão de obra, sendo uma ótima alternativa para sistemas que requerem algum tipo de controle, visto fácil simulação e modelagem para calibração e previsão de comportamento.

## 7. REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. T. D.; COUTO, S. M.; QUEIROZ, D. M. D.; PEIXOTO, A. B. **Determinação de propriedades térmicas de grãos de milho.** Ciência e Agrotecnologia, v. 28, n. 3, p. 488-498, 2004.

BEZERRA, J. H. **Estudo de sistema de controle usando o controlador PID em processos industriais.** Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP, 2007.

BORGES, F. B. **Descrição da secagem convectiva de grãos de milho através de modelos difusivos.** Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2016.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.M. **Drying and storage of grains and oilseeds.** New York: Van Nostrand Reinhold. 1992. 450p.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; DANTAS, L. A.; BRAGA, M. E. D. **Programa computacional para simulação de secagem de grãos.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 1, n. 1, p. 33-55, 1999.

CORREA, P. C.; CHRIST, D.; MARTINS, J. H.; MANTOVANI, B. H. M. **Curvas de dessecção e calor latente de vaporização para sementes de milho pipoca (Zea mays).** Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande , v. 2, n. 1, p. 75-79, Apr. 1998 .

DALPASQUALE, V. A.; SPERANDIO, D. **Modelo de simulação de secagem de produtos agrícolas usando entalpia do ar constante.** Eng. Agríc., Jaboticabal , v. 30, n. 4, p. 726-731, Aug. 2010 .

DANTAS, L. A.; MATA, M.; DUARTE, M. E. M. **Programa computacional dinâmico para simulação de secagem de grãos e sementes de milho.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 13, n. 3, p. 309-318, 2011.

DE ALENCAR, E. R.; FARONI, L. D. A.; Ferreira, L. G.; DA COSTA, A. R.; PIMENTEL, M. A. G. **Qualidade de milho armazenado e infestado por Sitophilus zeamais E Tribolium castaneum.** Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2011.

DIAMANTE, L. M.; IHNS, R.; SAVAGE, G. P.; VANHANEN, L. **A new mathematical model for thin layer drying of fruits.** International Journal of Food Science and Technology, v. 45, n. 9, p. 1956-1962, 2010.

DOYMAZ, İ. **Drying behaviour of green beans.** Journal of food Engineering, v. 69, n. 2, p. 161-165, 2005.

GARCIA, C. **Controle de processos industriais.** Blucher, 2017.

INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** Rio de Janeiro: LTC - Livros técnicos e Científicos Editora S.A. 5ª ed., 2003.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process dynamics control.** 3. ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2010.

SILVA, L. M. D. M.; SOUSA, F. C. D.; SOUSA, E. P. D., CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; DUARTE, M. E. M. **Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu.** Braz. J. Food Technol., Campinas , v. 17, n. 4, p. 310-318, Dec. 2014 .

