



# **Modelagem matemática e controle de câmara de fermentação para biscoito Cream Cracker**

Carlos Augusto Gonzalez Assef Miranda

Projeto de Final de Curso

Orientadores

Prof. Bruno Didier Olivier Capron, *D.Sc.*

Prof. Ricardo Schmitz Ongaratto, *D.Sc.*

Rio de Janeiro, RJ

Julho, 2022

# Modelagem matemática e controle de câmara de fermentação para biscoito Cream Cracker

*Carlos Augusto Gonzalez Assef Miranda*

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

Aprovado por:

---

*D.Sc.*

---

*D.Sc.*

Orientado por:

---

Prof. Bruno Didier Olivier Capron, *D.Sc.*

---

Prof. Ricardo Schmitz Ongaratto, *D.Sc.*

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Julho, 2022

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer em primeiro lugar a minha esposa Raquel Cruz Ferreira pelo apoio e incentivo incondicional. Obrigado por estar ao meu lado.

Agradeço aos meus pais e irmãos pelo apoio contínuo com estudos e todo o suporte necessário. Vocês sempre foram minha base.

Aos meus orientadores Bruno Didier Olivier Capron e Ricardo Schmitz Ongaratto por todo suporte e paciência ao longo da orientação no trabalho. Vocês me ensinaram muito ao longo do processo e tiveram um papel muito importante na minha formação.

Aos professores Andreia Medeiros Salgado e Carlos André Vaz Junior por todo apoio durante a graduação.

Aos meus amigos de graduação David Souza, Rafael Silveira, Filipe Araujo, Carol Jorge, Gaby Fornazier e Fernando Dorand pela companhia ao longo do curso e pelas arduas lutas travadas a cada período.

Aos amigos da LEGADO Consultoria Jr por despertar minha paixão pela engenharia.

Ao meu amigo Daniel Barbedo por todo apoio na trajetória do projeto.

Por fim, agradeço aos membros da banca examinadora pela disponibilidade de avaliar este projeto final.

## RESUMO

A fermentação da massa é uma das etapas mais importantes na produção do biscoito *Cream Cracker*, pois garante o crescimento da massa pela geração de gases em seu interior e o sabor característico do produto. Por ser uma etapa essencial é preciso ter um controle eficiente da temperatura da massa durante o processo. Conseqüentemente, é necessário desenvolver um modelo de qualidade para o processo de modo a obter uma boa sintonia dos controladores envolvidos. O objetivo desse estudo foi, então, avaliar a modelagem matemática e o controle de uma câmara durante a etapa de fermentação no processo de produção de biscoito do tipo *Cream Cracker*. Para a modelagem matemática foi realizado o balanço de energia para a câmara de fermentação. Em seguida, foram parametrizados controladores utilizando diferentes métodos (tentativa e erro, a ferramenta Autotuning do Matlab® e síntese direta). Foram avaliados os seus desempenhos frente a perturbações degrau no *setpoint* e nos distúrbios (vazão de ar, número de carrinhos de esponja, abertura da porta da câmara e perda de calor pelas paredes) de forma a escolher o controlador com menor Integral do valor Absoluto do Erro (*IAE* em inglês), menor tempo de estabilização e *overshoot* menor que 10%. Foi possível obter controladores que geram respostas estáveis pelo método tentativa e erro, síntese direta e pela ferramenta Autotuning, sendo este o controlador melhor avaliado pelos critérios utilizados.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	9
3	MODELAGEM MATEMÁTICA .....	21
3.1	Hipóteses simplificadoras.....	21
3.2	Balanco de energia .....	22
3.3	Linearização do modelo matemático.....	23
3.4	Funções de transferência do modelo matemático .....	24
4	METODOLOGIA.....	26
4.1	Cálculo da energia gerada pela fermentação da esponja ( $Q_{ferm.}$ ) e vazão mássica de ar no estado estacionário ( $w$ ) .....	26
4.2	Desenvolvimento do sistema de controle para a câmara de fermentação .....	27
4.3	Premissas iniciais.....	27
4.4	Sintonia do controlador ( $G_c$ ) pelo método de síntese direta.....	29
4.5	Sintonia do controlador no <i>Simulink</i> .....	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	31
6	CONCLUSÃO .....	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
	APÊNDICE 1 – CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO DO AR NO EXPERIMENTO DO CALOR DE FERMENTAÇÃO.....	47
	APÊNDICE 2 – CÁLCULO DO CALOR ESPECÍFICO (CP) DA ESPONJA DE CREAM CRACKER.....	48
	APÊNDICE 3 – CÁLCULO DA TAXA DE CALOR DEVIDO A ABERTURA DAS PORTAS DA CÂMARA ( $Q_{porta}$ ) .....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Formulação utilizada na produção dos biscoitos Crackers.....	12
Tabela 2 - Formulação para Esponja de <i>Cream Cracker</i> .....	26
Tabela 3 - Temperatura da esponja durante o experimento.....	31
Tabela 4 - Parâmetros de processo e funções de transferência .....	32
Tabela 5 - Parâmetros e respostas do controlador parametrizado pelo método de tentativa e erro.....	37
Tabela 6 - Parâmetros obtidos para os controladores sintonizados para um degrau no <i>setpoint</i> .....	38
Tabela 7 - Parâmetros e resposta do controlador parametrizado pelo método <i>autotuning</i> .....	40
Tabela 8 - Parâmetros e resposta do controlador parametrizado pelo método síntese direta .....	42
Tabela 9 - Comparação entre a resposta obtida para a simulação nos diferentes controladores.....	42
Tabela 10 - Efetividade dos dispositivos de proteção de porta da câmara fria .....	50

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Percentual de vendas de biscoitos em 2018 .....	10
Figura 2 – Etapas básicas do processo de fabricação de biscoito .....	12
Figura 3 - Método de fermentação em duplo estágio .....	14
Figura 4 - Câmara de fermentação de produtos <i>Cream Cracker</i> . .....	14
Figura 5 - Misturador de haste vertical.....	15
Figura 6 - Fluxograma para a técnica de <i>feedback</i> negativo .....	16
Figura 7 - Componentes em uma resposta a um degrau unitário .....	17
Figura 8 - Ferramenta de autotuning no Matlab.....	20
Figura 9 - Carrinho para esponja/massa industrial .....	21
Figura 10 - Esquema da câmara de fermentação.....	22
Figura 11 - Diagrama de blocos para a Câmara de fermentação.....	28
Figura 12 - Esquema simplificado para sintonizar o controlador por tentativa e erro e <i>autotuning</i> .....	30
Figura 13 - Diagrama de blocos da malha de controle aberta.....	33
Figura 14 - Resposta para um degrau no distúrbio D1 e D2. ....	33
Figura 15 - Resposta para um degrau no distúrbio D3. ....	34
Figura 16 - Diagrama de blocos da malha de controle fechada. ....	34
Figura 17 - Resposta para um degrau no <i>setpoint</i> utilizando um controlador parametrizado pelo método de tentativa e erro. ....	35
Figura 18 - Resposta para um degrau em D1 e D2 utilizando um controlador parametrizado pelo método de tentativa e erro.....	36
Figura 19 - Resposta para um degrau em D3 utilizando um controlador parametrizado pelo método de tentativa e erro. ....	36
Figura 20 - Resposta para a simulação utilizando um controlador parametrizado pelo método de tentativa e erro. ....	36
Figura 21 - Resposta comparativa para um controlador utilizando a ferramenta Autotuning e para um controlador obtido pelo método de tentativa e erro. ....	37
Figura 22 - Resposta para um degrau no <i>setpoint</i> utilizando um controlador parametrizado pelo método <i>autotuning</i> .....	38
Figura 23 - Resposta para um degrau em D1 e D2 utilizando um controlador parametrizado pelo método <i>autotuning</i> .....	39
Figura 24 - Resposta para um degrau em D3 utilizando um controlador parametrizado pelo método <i>autotuning</i> .....	39
Figura 25 - Resposta para a simulação utilizando um controlador parametrizado pelo método <i>autotuning</i> .....	39
Figura 26 - Resposta para um degrau no <i>setpoint</i> utilizando um controlador parametrizado pelo método síntese direta.....	40
Figura 27 - Resposta para um degrau em D1 e D2 utilizando um controlador parametrizado pelo método síntese direta. ....	41

Figura 28 - Resposta para um degrau em D3 utilizando um controlador parametrizado pelo método síntese direta.....	41
Figura 29 - Resposta para a simulação utilizando um controlador parametrizado pelo método síntese direta.....	41

## 1 INTRODUÇÃO

Biscoito é um alimento consumido no mundo inteiro e o Brasil ocupa a posição de 4º maior vendedor mundial de biscoitos, com registro de 1,492 milhões de toneladas comercializadas em 2018. Deste volume o biscoito *Cream Cracker* é o segundo mais consumido (21,9%) (ABIMAPI, 2021).

Um cliente satisfeito volta a consumir o produto e ele espera um produto igual ao consumido anteriormente. Portanto, a padronização é um fator importantíssimo para a produção e comercialização dos biscoitos cream cracker. Para que o mesmo padrão seja mantido, é de grande importância que haja controle nos parâmetros operacionais em cada etapa produtiva.

A produção de biscoito *Cream Cracker* envolve seis etapas, entre elas uma das mais importante é a mistura dos ingredientes e fermentação da massa. A fermentação da massa é realizada pelo método esponja e massa ou duplo estágio. A fase esponja\*, formada apenas de farinha, água, gordura e fermento, é a etapa longa que é crucial para o desenvolvimento dos gases na massa, sabor, das propriedades reológicas e das características do produto final como espessura, aeração do biscoito, entre outros. Essas características são afetadas pelo tempo de fermentação e pela temperatura e umidade relativa do ambiente.

Para a fermentação, crescimento e geração dos gases na esponja, observa-se que as condições de temperatura ambiente e umidade relativa do ar precisam ser controladas em faixas estreitas, para manter a atividade do fermento biológico em condição ótima. Sem o controle, variações climáticas podem acarretar variações na massa e, conseqüentemente, do seu desempenho no processo e, por fim, nas características do produto. Para isto, faz-se necessário o crescimento em câmaras de fermentação, que são ambientes com temperatura e umidade relativa controladas. Porém, na indústria muitas vezes esta é uma operação realizada sem o controle adequado das condições ideais de fermentação.

O presente estudo teve como objetivo geral desenvolver a modelagem e controle para uma câmara de fermentação para esponja de biscoito *Cream Cracker*. Para atender ao objetivo geral do presente trabalho, os seguintes objetivos específicos foram delineados:

1. O desenvolvimento de um modelo matemático para representar as variações de temperatura dentro da câmara de fermentação;
2. A parametrização de um controlador PID para controlar a temperatura da câmara utilizando três métodos de sintonia distintos: Tentativa e Erro, a ferramenta *Autotuning* do Matlab® e síntese direta;
3. Avaliar o desempenho dos controladores frente a degraus no *setpoint* e nos distúrbios.

---

\* Uma explicação mais detalhada do método se encontra na Seção 2.3

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A indústria de biscoito

#### 2.1.1 Definições

Biscoito foi o termo usado para descrever um pão endurecido que podia ser guardado durante muito tempo, pois se conservava sem se danificar. Originalmente, o termo deriva do latim das palavras “bis” e “coctus” ou do francês das palavras “bis” “cuit” que significam duas vezes cozido (BERTOLINO e BRAGA, 2017). Na história, o biscoito se consolidou na cultura alimentar, como parte indissociável da alimentação em todo o mundo por ser um alimento nutritivo, prático e de vida útil longa (REGO, VIALTA e MADI, 2020). Conforme é definido pela Resolução 12 de 1978 da Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos (CNNPA), “biscoito ou bolacha é o produto obtido pelo amassamento e cozimento conveniente de massa preparada com farinha, amido, féculas, fermentadas ou não, e outras substâncias alimentícias”.

Segundo Bertolino e Braga (2017), os tipos de biscoito são classificados de acordo com o modo de moldagem ou corte da seguinte forma:

- a) Biscoitos laminados ou estampados salgados (*cream cracker*, *snack cracker* e água e sal);
- b) Biscoitos laminados ou estampados doces (Maria, Maisena, Leite, etc.);
- c) Biscoitos Rotativos ou Amanteigados (Moldados, Recheados, etc);
- d) Biscoitos de Deposição (*wafer*, *champagne*, etc.).

#### 2.1.2 Aspectos econômicos

O Brasil ocupa a posição de 4º maior vendedor mundial de biscoitos, com registro de R\$ 14,3 bilhões em receita e 1,492 milhões de toneladas comercializadas em 2018, segundo os dados da Nielsen, elaborados e divulgados pela ABIMAPI (ABIMAPI, 2021). O consumo *per capita* de biscoito em 2018 foi de 7,154 Kg/hab, segundo Nielsen e IBGE. Embora este consumo seja ainda inferior comparado com outros países como Holanda, Irlanda, Bélgica e Inglaterra, os biscoitos industrializados são bastante consumidos no Brasil, com presença em mais de 90% dos lares no país (ABIMAPI, 2021). Analisando o padrão de consumo dos brasileiros verifica-se que os biscoitos mais vendidos em 2018 foram os recheados (287.360 toneladas), água e sal / *cream cracker* (253.460 toneladas) e secos / doces especiais (160.406 toneladas), de modo que a categoria de biscoitos *cream craker* ocupa uma fatia de mercado equivalente a 21,9% (Figura 1).

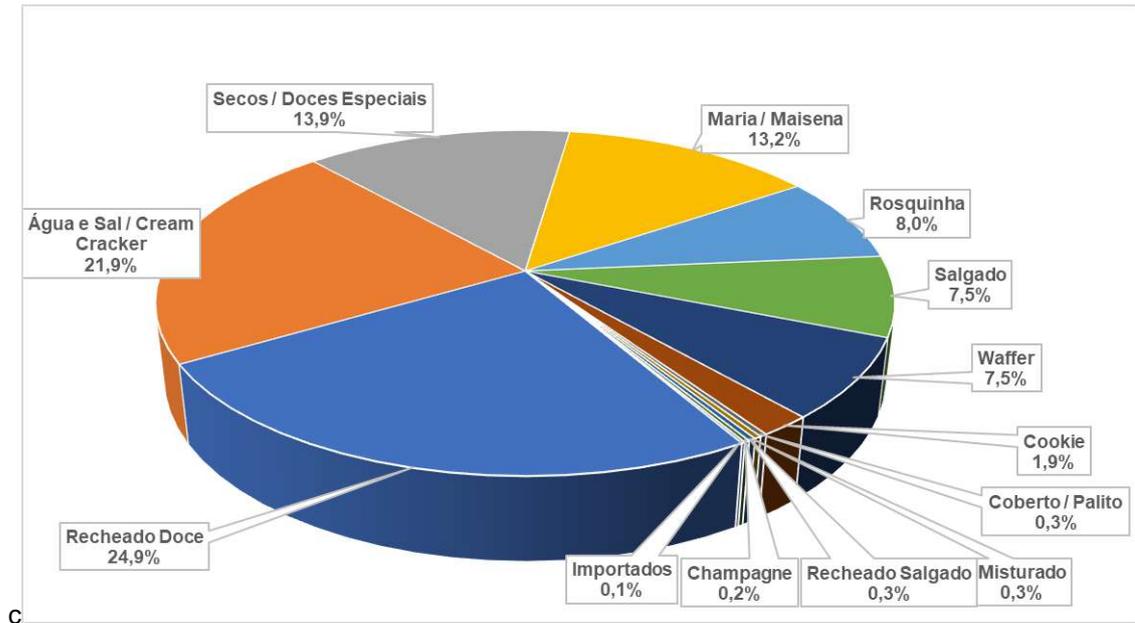


Figura 1 - Percentual de vendas de biscoitos em 2018

Fonte: NIELSEN e ABIMAPI, 2021

## 2.2 Processamento de biscoito tipo Cream Cracker

Biscoitos *Cream Cracker* foram introduzidos em 1885 pela empresa irlandesa de Jacobs. Desde então, têm mantido um lugar significativo nas vendas dos biscoitos na Grã-Bretanha e tornou-se popular em muitos países (MANLEY, 2011).

Embora o termo “*Cream*” esteja mundialmente associado à utilização de leite no caso do biscoito, a denominação *Cream Cracker* é tradicional: a massa não contém leite, sendo a receita constituída simplesmente por farinha, gordura e sal. A massa é sempre fermentada, é passada na laminação, cortada em pequenas fatias e assada. A combinação das proteínas modificadas da farinha durante a fermentação e a laminação em camadas, propicia as características de lâminas, colmeias e bolhas do produto (MANLEY, 2011).

O processo de fabricação de biscoito tipo *Cream Cracker* é constituído das seguintes operações unitárias: mistura dos ingredientes e preparação da massa, laminação, estampagem, forneamento, resfriamento e acondicionamento do produto (BERTOLINO e BRAGA, 2017). Cada etapa do processo é desenhada para dar ao produto suas características como sabor, crocância, textura, abertura entre as camadas do produto, cor entre outras. A preparação da massa é dividida em duas etapas, fase esponja e fase reforço. A esponja é composta apenas de parte dos ingredientes (farinha, água, gordura, açúcar e fermento) e passa por longo período de fermentação na qual é ideal um ambiente com temperatura controlada.

### 2.2.1 Matérias-primas

As matérias-primas utilizadas na fabricação de biscoito *Cream Cracker* são:

- Farinha de trigo, que possibilita a formação de uma massa devido às proteínas formadoras do glúten (MANLEY, 2011);
- Água, que participa em reações químicas e bioquímicas na massa, influenciando nas propriedades físicas como consistência, extensibilidade, pegajosidade, maleabilidade, elasticidade e umidade (MELO, 2002);
- Gordura, que tem a função de amaciador, contribuindo para o aroma e sabor, melhoria da expansão e lubrificação da massa (MORETTO, 1999);
- Açúcar, que fornece sabor, cor, textura, expansão e nos processos fermentados serve de alimento ao fermento (BERTOLINO e BRAGA, 2017);
- Fermento biológico, geralmente *Saccharomyces cerevisiae*, ele atua como agente de crescimento, fonte de enzimas e melhorador de sabor (PIZZINATO, 1979);
- Sal (cloreto de sódio), que age como estabilizador da fermentação. Além disso é capaz de diminuir a absorção de água, ajudar no fortalecimento do glúten e sabor do produto final (MORETTO, 1999);
- Bicarbonato de sódio, que tem a função de controlar o pH do produto, a fim de desenvolver cor e sabor adequados (MORETTO, 1999);
- Malte, que é utilizado na fase de reforço dos biscoitos tipo *Cracker* para compensar o açúcar perdido durante o período de fermentação da esponja, isto contribui para melhorar o crescimento da massa (MORETTO, 1999);
- Enzimas, que são utilizadas como catalisadores de processo. Alguns exemplos de enzimas utilizadas são as amilases, hemiceluloses, proteases e lipases (MANLEY, 2011).

### 2.2.2 Formulação

Cada tipo de biscoito possui uma formulação característica. Para biscoitos fermentados, como *Cracker*, suas massas utilizam fermento biológico e são, geralmente, produzidos pelo método de esponja e massa, com longo tempo de fermentação. Esse produto requer farinha mais forte (10-11% de proteína) em comparação com a farinha utilizada em biscoitos doces, principalmente para a fase de esponja, visto que deverá suportar maior manuseio e duas etapas de fermentação (QUAGLIA, 1999).

De acordo com MORETTO (1999), as fórmulas dos biscoitos cracker variam principalmente dependendo da farinha de trigo utilizada. Uma fórmula típica de biscoito cracker é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Formulação utilizada na produção dos biscoitos Crackers.

Ingredientes	1ª Etapa: Esponja (%)	2ª Etapa: Massa (%)
Farinha de trigo	70	30
Gordura	10 – 12	0,0
Fermento	0,3 – 0,5	0,0
Água	43 – 45 (dependendo da farinha)	0,0
Sal	0,0	1 – 2
Malte	0,0	1 – 2
Bicarbonato de sódio	0,0	0,6 (para esponja a 28°C)

Fonte : MORETTO, 1999

### 2.2.3 Processo de fabricação de biscoito *Cream Cracker*

O processo de fabricação de biscoito tipo *Cream Cracker* é constituído das seguintes operações unitárias: mistura dos ingredientes e preparação da massa, laminação, estampagem, forneamento, resfriamento e acondicionamento do produto, como visto na Figura 2 (BERTOLINO e BRAGA, 2017).

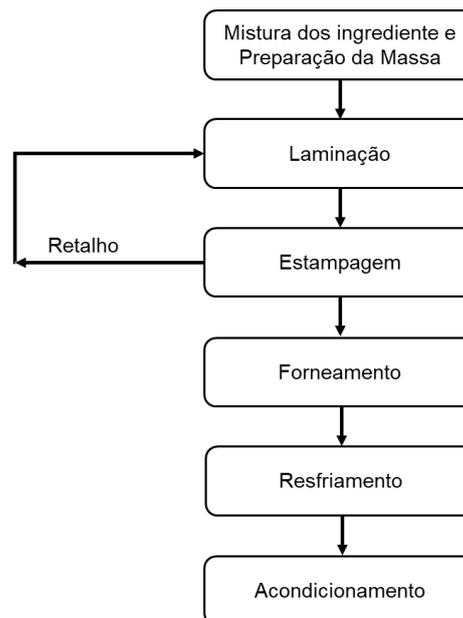


Figura 2 – Etapas básicas do processo de fabricação de biscoito

Fonte : BERTOLINO e BRAGA, 2017.

No preparo da massa as matérias primas são dosadas, misturadas para a formação da massa e deixadas fermentando por um longo período. Segundo Bertolino e Braga (2017), o processo de mistura tem como função a homogeneização dos ingredientes para formar uma massa uniforme, o desenvolvimento do glúten da farinha (na etapa de reforço) e a aeração da massa. O preparo das massas do biscoito *Cream Cracker* é feito pelo método de dois estágios (esponja e reforço), conforme abordado com mais detalhes na Seção 2.3.

Após o término da fermentação, a massa é conduzida para a laminadora, sendo introduzida na moega de alimentação. No fundo da moega existem rolos estriados que ajudam a formar uma lâmina espessa e contínua de massa. Entre os alimentadores existe um distribuidor de farofa, que espalha farofa entre as lâminas. Esta lâmina de massa passa através de uma série de rolos, os quais reduzem a sua espessura por etapas. A lâmina fina é então dobrada sobre si mesma pela secção da máquina conhecida como dobradora. O número de dobras pode variar, mas é comumente encontrada de 4 a 6 camadas de massa empilhada de tal modo a formar um ângulo reto com a direção do movimento da massa. Esta pilha de massa é então reduzida novamente em espessura por outra série de rolos laminadores, sendo que no último par é feito o controle de espessura da massa de modo a ter um determinado número de biscoitos por unidade de peso e volume. A lâmina de massa passa no rolo moldador-cortador, onde a massa adquire o formato característico do produto e segue para o forneamento (PIZZINATO, 1979).

No forneamento ocorre a transformação da massa crua em biscoito. A massa segue por uma esteira transportadora metálica passando através da câmara de assamento. Tal como acontece com outros biscoitos, o cozimento cria a textura, seca o produto e colore as superfícies (MANLEY, 2011; BERTOLINA e BRAGA, 2017).

Após a etapa de forneamento, o produto é resfriado, através de esteiras que vão em direção às máquinas de acondicionamento (PIZZINATO, 1979). Se esta fase não for bem-feita pode ocorrer trincos e quebra do biscoito na embalagem. Para evitar isto o resfriamento deve ser feito lentamente e sem circulação de ar ambiente (BERTOLINO e BRAGA, 2017).

Na área de acondicionamento o produto é embalado com material capaz de proteger o produto contra danos mecânicos, contra contaminações externas como pragas de cereais, bactérias, fungos e poeiras, evitar perda ou ganho de umidade, impedir o início da rancidez e exposição à luz e ao oxigênio (BERTOLINO e BRAGA, 2017).

### **2.3 Processo de fermentação – Método duplo estágio**

De acordo com Moretto (1999), os biscoitos *cream cracker* utilizam fermento biológico e, geralmente, longo período de fermentação. Acredita-se que as mudanças físicas e químicas que ocorrem durante a fermentação sejam responsáveis pelo sabor típico e, em parte, pela textura final que caracterizam esses biscoitos.

A preparação da massa é feita utilizando o método de dois estágios (esponja e massa), exemplificada na Figura 3. Na primeira etapa onde é feita a esponja, a farinha é misturada com água, gordura, açúcar, fermento, malte e outras enzimas, se for necessário, e deixa-se fermentar por 5-24 h na câmara de fermentação a uma temperatura variando entre 26 e 30°C e em uma umidade relativa variando entre 70 e 85%. Na segunda etapa, após o período de fermentação, retira-se a esponja da câmara, adiciona-se mais farinha, bicarbonato de sódio, sal e outros ingredientes para reforçar a esponja, para formar a massa. Essa massa é deixada fermentando por um período de 1 a 5 h

(BERTOLINO e BRAGA, 2017). A Figura 4 mostra uma sala de fermentação, contendo esponjas nessa fase do processo.



Figura 3 - Método de fermentação em duplo estágio

Fonte: EL HALAL, 2017



Figura 4 - Câmara de fermentação de produtos *Cream Cracker*.

Fonte : Autor

A esponja e a massa são geralmente misturadas em misturadores (ou masseiras) de eixo vertical. Máquinas de dois ou três fusos são usadas com mistura lenta na velocidade de 25 rpm. A ação de mistura lenta e suave incorpora bem os ingredientes sem entrada de trabalho indevido no estágio de esponja (DAVIDSON, 2016). A Figura 5 mostra um exemplo de misturador de eixo vertical.

A esponja é misturada como uma mistura *'all in'*. A esponja é misturada a uma temperatura variando entre 30 e 35°C, que é a temperatura ideal para a ação do fermento. A esponja é fermentada por 18 h a uma temperatura de 30-35°C e uma umidade relativa de aproximadamente 80%. Durante este tempo, o valor do pH mudará de cerca de 5,8 a 4,0, e a temperatura da esponja aumentará. Após a fermentação da esponja os ingredientes adicionais para a massa são adicionados, incluindo o bicarbonato de sódio. É necessária uma mistura em baixa velocidade até que uma massa homogênea seja feita. A mistura excessiva reduzirá a expansão e dará um produto duro. Após a mistura, a massa é devolvida à câmara de fermentação para descansar por até 6 h (DAVIDSON, 2016).



Figura 5 - Misturador de haste vertical

Fonte : DAVIDSON, 2016

## 2.4 Câmara de fermentação

A câmara de fermentação cria o ambiente ideal para a fermentação da esponja e da massa. Por serem hermeticamente fechadas, pode-se controlar seus parâmetros: temperatura ambiente e umidade relativa. Diferente das câmaras de fermentação utilizadas na panificação, devido às proporções dos tachos utilizados para fermentação da esponja, não existe um equipamento próprio para fermentação. Uma câmara de fermentação para uma indústria de biscoito é um salão amplo com um sistema de controle de temperatura e umidade atuando para obter as condições ótimas para fermentação da esponja/massa.

Como se trata de uma reação biológica, com uma massa que fermenta, é muito importante observar cuidadosamente as temperaturas e umidades ao redor da massa. As salas de fermentação devem estar à temperatura inicial da massa ou um pouco acima dela, entre 26 e 30°C. A umidade relativa correta depende da temperatura, mas são necessários níveis entre 80 e 90% (MANLEY, 2011).

Realizar a fermentação sem controlar a temperatura e umidade relativa pode até gerar bons produtos, entretanto significa ficar à mercê das variações climáticas, o que pode acarretar variação da massa e, conseqüentemente, do seu desempenho no processo e por fim nas características do produto. Uma planta industrial numa região onde as condições se assemelham à ideal para a ação ótima do fermento poderá desenvolver bons produtos mesmo sem um controle artificial. Por outro lado, numa região mais fria ou com baixa umidade relativa, poderão ocorrer problemas (BERTOLINO e BRAGA, 2017).

## 2.5 Sistema de controle e automação de processos

Segundo Seborg *et. al* (2017), o objetivo principal do controle de processo é manter um processo nas condições operacionais desejadas, com segurança e economia, enquanto atende os requisitos de qualidade e especificação do produto.

O controle é, então, uma etapa crítica na produção de alimentos, uma vez que a segurança do processo e qualidade final do produto são prioridades nesse caso. Um controle automatizado irá garantir uma maior consistência na operação, podendo reduzir custos e aumentar a segurança e qualidade do produto (BRESNAHAN, 2011).

Dentro das estratégias de controle de um processo, a mais conhecida e utilizada é o *feedback* negativo, cujo objetivo é reduzir o sinal do erro a zero (SEBORG *et. al*, 2017). A medição da variável controlada é realimentada à malha de controle, por isso o termo *feedback*. Já o termo negativo está relacionado com o sinal que a informação receberá ao entrar novamente no loop sob forma de um erro associado à variável medida. O controle *feedback* é oscilatório por natureza e é importante que sejam feitas configurações corretas para que a sintonia do controlador leve à estabilidade (BRESNAHAN, 2011).

Uma malha de controle fechada (Figura 6) é o conjunto de instrumentos que representa a implementação prática de uma estratégia de controle. É composta basicamente por três elementos:

- O conjunto sensor-transmissor, que fornece informações de uma variável controlada para o controlador;
- Controlador, que tem como objetivo manter o processo estável a partir dos sinais do sensor e da sua programação interna (função matemática), acionando ou não o atuador;
- Atuador, que responde aos comandos do controlador alterando a variável manipulada com o objetivo de levar de volta ou manter a variável controlada no seu *setpoint*.

Em primeiro lugar a variável do processo a ser controlada é medida por um sensor, em seguida esse valor é comparado com o *setpoint*, obtendo um erro. Esse sinal do erro é enviado para o controlador que envia um sinal de controle para o atuador alterando a variável manipulada, o que irá afetar a variável de controle, com o objetivo de zerar o erro.

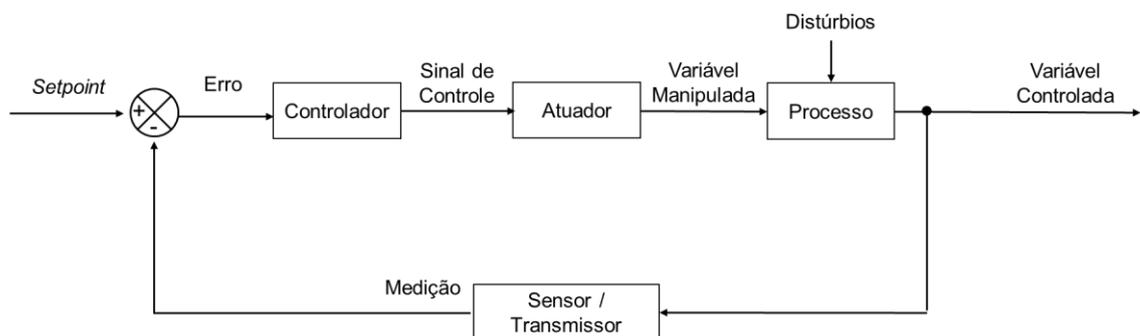


Figura 6 - Fluxograma para a técnica de *feedback* negativo

Fonte : SEBORG *et. al*, 2017

Para processos industriais o controlador mais utilizado é o controlador PID devido a sua simplicidade e boa performance. A sigla PID significa controlador proporcional, integral e derivativo. Para a análise da resposta em malha fechada obtida por um controlador, alguns índices de desempenho podem ser usados, conforme Figura 7 (SEBORG *et. al*, 2017):

- Tempo de delay – tempo que a variável de saída do processo leva alcançar a metade do valor final pela primeira vez;
- Tempo de subida – tempo que a variável de saída do processo leva para alcançar pela primeira vez o novo valor em estado estacionário;
- Tempo de pico – tempo que a variável de saída do processo leva para alcançar o primeiro pico de *overshoot*;
- *Overshoot* – Divisão entre o valor de a e b, descritos na Figura 7;
- Tempo de estabilização – Tempo necessário para que a variável de saída do processo (y) alcance e permaneça dentro de uma banda cuja largura seja igual a  $\pm 5\%$  da variação total ( $\pm 1\%$  também é usado para algumas aplicações).

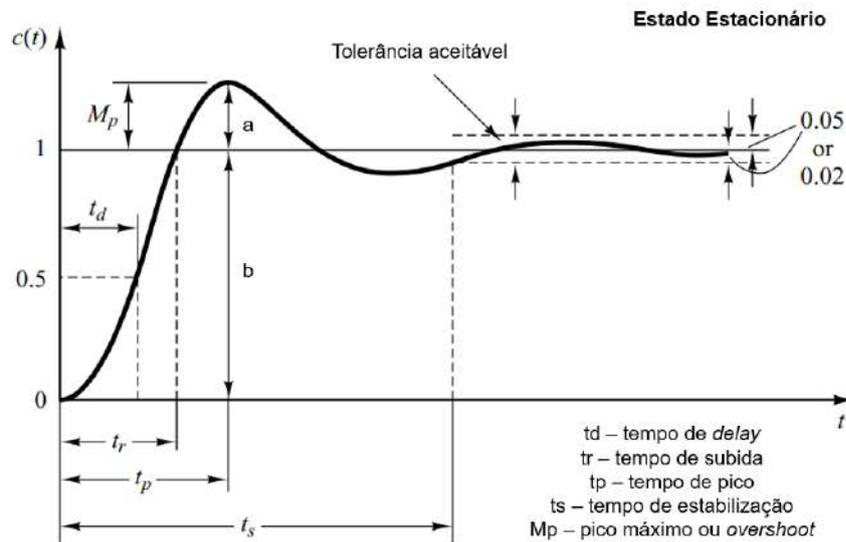


Figura 7 - Componentes em uma resposta a um degrau unitário

Fonte: Adaptado de OGATA, 2010.

Conforme descrito acima, o controle PID possui 3 modos e cada um deles contribui para o sinal de controle de formas diferentes. O modelo do controlador PID utilizado neste trabalho foi o PID paralelo clássico que está representado na Equação 1, em que  $K_c$  é o ganho proporcional,  $\tau_i$  é o tempo integral e  $\tau_d$  é o tempo derivativo.

$$G_c(S) = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_i S} + \tau_d S \right) \quad (1)$$

O controle proporcional é uma resposta em proporção ao erro e o sinal do  $K_c$  fará com que o sinal de saída do controlador aumente ou diminua de acordo com o aumento do sinal do erro (SEBORG *et. al*, 2017). Uma desvantagem da utilização apenas do controle proporcional é que este sempre resulta em uma resposta com um *offset* após a perturbação do sistema (BRESNAHAN, 2011). A parte

integral do controlador irá fornecer informações baseadas no erro acumulado ao longo do tempo. Utilizando um controlador PI é possível retirar o *offset* obtido pelo controlador proporcional, entretanto ele tende a instabilizar o processo em malha. A parte derivativa do controlador fornece informações sobre a taxa de variação do erro (BRESNAHAN, 2011). A partir da taxa de variação do erro, o controle derivativo consegue antecipar o comportamento futuro. Ao fornecer ação de controle antecipadamente, tende-se a estabilizar o processo controlado. Assim, o controle derivativo é frequentemente usado para neutralizar a tendência desestabilizadora do modo integral e com isso estabilizar o processo (SEBORG *et. al*, 2017).

Uma aplicação do controle *feedback* é o controle de temperatura do ar dentro da câmara de fermentação, como no caso do presente trabalho. A variável controlada é a temperatura do ar e para medir esse parâmetro é utilizado um sensor. O controlador irá avaliar se a temperatura está muito alta ou muito baixa, comparando o valor medido com o *setpoint*. Então será ajustada a válvula da corrente de ar de resfriamento, para obter a temperatura desejada.

## 2.6 Métodos de sintonia de Controlador PID

Uma vez que um sistema de controle esteja instalado, os ajustes dos parâmetros do controlador devem ser realizados até que o desempenho do sistema seja considerado satisfatório. Esta atividade é chamada de sintonia do controlador. Como na prática a sintonia é muitas vezes realizada por tentativa e erro, essa tarefa pode ser demorada.

Métodos de pré-sintonia podem então ser usados para especificar as configurações do controlador antes da instalação do sistema de controle. O objetivo destes métodos é fornecer boas configurações iniciais do controlador que podem ser posteriormente ajustadas on-line, se necessário. Como o ajuste on-line pode ser demorado, é muito útil ter boas configurações iniciais do controlador para minimizar o tempo e o esforço necessários (SEBORG *et. al*, 2017).

### 2.6.1 Método de síntese direta (DS)

No método de Síntese Direta (DS), o projeto do controlador é baseado em um modelo de processo e uma função de transferência de malha fechada desejada. Este método é usualmente aplicado para mudanças de *setpoint*. A abordagem DS fornece informações valiosas sobre a relação entre o modelo de processo e o controlador resultante. Embora os controladores resultantes nem sempre tenham uma estrutura PID, o método DS produz controladores PI ou PID para modelos de processos comuns (SEBORG *et. al*, 2017).

## 2.6.2 Método de simulação computacional

O método de simulação computacional baseia-se em modelagem matemática de processos para simular a sintonia de controladores em ambiente virtual. Segundo Seborg *et al*, (2017), a simulação por computador do processo controlado pode fornecer informações consideráveis sobre o comportamento dinâmico e o desempenho do sistema de controle. Em particular, softwares como MATLAB e Lab VIEW facilitam a comparação de estratégias de controle alternativas e diferentes configurações do controlador.

### 2.6.2.1 Simulação computacional - Métodos tentativa e erro

O método tentativa e erro visa encontrar os parâmetros de sintonia do controlador utilizando uma simulação da malha de controle do processo e ajustes graduais no parâmetro proporcional, seguido do integrativo e depois o derivativo.

Inicialmente aumenta-se a ação proporcional do controlador para aumentar a velocidade da resposta. Em seguida acrescenta-se a ação integrativa para obter uma resposta de estado estacionário desejada, entretanto como desvantagem pode-se obter uma resposta oscilante mais alta durante um período mais longo. Por fim, acrescenta ação derivativa para fins de amortecimento, balanceando os efeitos oscilatórios gerados pela ação integrativa.

### 2.6.2.2 Método de simulação computacional com a ferramenta *Autotuning* do Matlab

Este método de simulação realiza experimentos de estimativa de resposta de frequência na malha de controle. Quando o experimento termina, o programa usa a resposta de frequência estimada para calcular os ganhos do controlador PID. Quando o *Tuner* do Matlab é iniciado, o *software* calcula um modelo de planta linearizado visto pelo controlador, identificando automaticamente a entrada e saída da malha de controle e utilizando o ponto de operação atual para a linearização. Ele simula um controlador PID inicial para obter uma compensação razoável entre desempenho e robustez. A partir desse ponto é possível ajustar manualmente o controlador alterando dois critérios: tempo de resposta (mais rápido ou lento) e comportamento transiente (mais agressivo ou robusto), como pode ser observado na Figura 8 (MATHWORK, 2021).

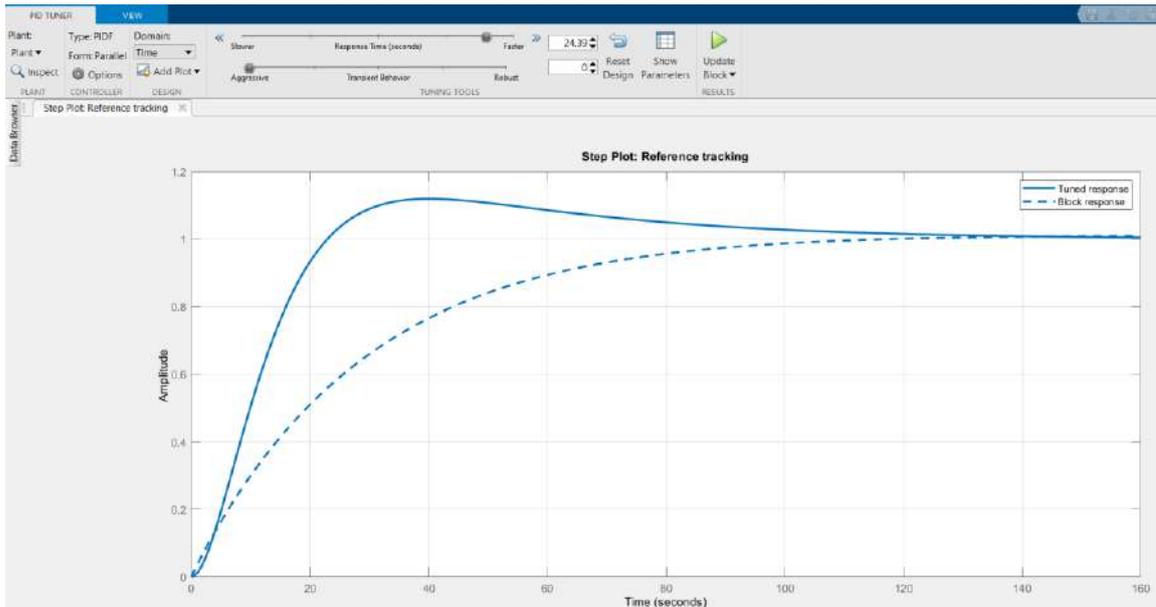


Figura 8 - Ferramenta de autotuning no Matlab

Fonte : Matlab

## 2.7 Avaliação de modelos baseado em critérios de erro integral

Crítérios de avaliação de sintonia do controlador foram desenvolvidas para otimizar a resposta em malha fechada para um modelo de processo simples e uma perturbação especificada ou mudança de *setpoint*. As configurações ótimas minimizam um critério de erro integral. Três critérios populares de erro integral são a integral do valor absoluto do erro (em inglês *Integral of the Absolute value of the Error*, ou IAE), integral do erro quadrático (em inglês *Integral of the Squared Error*, ou ISE) e integral do erro absoluto ponderado no tempo (em inglês *Integral of the Time-weighted Absolute Error*, ou ITAE) (SEBORG *et. al*, 2017). Nas Equações 2, 3 e 4 estão presentes a forma de calcular cada um dos erros, sendo  $e(t)$  o sinal de erro da diferença entre o *setpoint* e o valor medido.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2)$$

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (3)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (4)$$

O critério ISE penaliza grandes erros, enquanto o critério ITAE penaliza erros que persistem por longos períodos de tempo. Em geral, o ITAE é o critério preferido, porque geralmente resulta nas configurações do controlador mais conservadoras. Por outro lado, o critério ISE fornece as configurações mais agressivas, enquanto o critério IAE tende a produzir configurações do controlador que estão entre aquelas para os critérios ITAE e ISE (SEBORG *et. al*, 2017).

### 3 MODELAGEM MATEMÁTICA

O presente estudo propôs-se a implementar um controlador para a temperatura de uma câmara de fermentação para esponja de biscoito *Cream Cracker*. Esta câmara de fermentação hipotética foi descrita por um modelo matemático de uma câmara de fermentação real. Seus parâmetros foram aproximados para valores típicos encontrados na indústria em situações regulares de trabalho.

O modelo pode ser validado através da obtenção de dados experimentais medidos em uma câmara de fermentação real cujos valores serão comparados com os valores obtidos pelo modelo. Embora a validação seja uma etapa importante, esta foge do escopo do presente trabalho. A precisão do modelo é sustentada pela obtenção dos parâmetros de uma referência real.

#### 3.1 Hipóteses simplificadoras

Para realizar a modelagem da câmara de fermentação utilizou-se como referência a câmara de fermentação da Unidade GMA da M. Dias Branco S.A. Indústria e Comércio de Alimentos, localizada em Salvador/BA. A câmara possui dimensão 44,5m x 4,00m x 3,85m, com duas portas de 2,20m x 2,5m, com capacidade ocupacional de até 60 carrinhos de esponja com tempo de fermentação de 12h. A câmara está equipada com 20 bicos *spraying sistem* para controle de umidade, 2 *Fancoil* de 20TR da Hitachi para controle da temperatura e 3 sensores de temperatura/umidade. Assume-se a válvula de atuação do *fancoil* sendo uma válvula linear. A câmara está localizada no interior da fábrica onde não há radiação solar incidindo em sua parte externa e ela possui parede com isolamento térmico de poliuretano.

O carrinho para esponja/massa industrial considerado para os cálculos possui formato de dois cilindros curtos sobrepostos com 1,6 m de comprimento, 0,97 m de largura e 0,7 m de altura (Figura 9). Como simplificação foi considerado um cilindro circular de mesmo volume com 0,66 m de raio e 0,7 m de altura (5,64 m<sup>2</sup> de área superficial e 0,958 m<sup>3</sup> de volume).

Outra variável da modelagem é o ar que entra pelo sistema de refrigeração que pode variar a temperatura e umidade relativa. Como simplificação, consideraram-se a temperatura e a umidade relativa do ar que entra na câmara constantes, a vazão mássica de ar que entra e que sai da câmara iguais e constantes, e a temperatura externa à câmara maior que a temperatura interna.



Figura 9 - Carrinho para esponja/massa industrial

Fonte: Camargo Industrial (2022)

### 3.2 Balanço de energia

Para a modelagem do processo foi realizado o balanço de energia para a câmara de fermentação, representado na Equação 5, em que  $\dot{E}_{acu}$  é a taxa de energia que se acumula no volume de controle,  $\dot{E}_{ent.}$  é a taxa de energia de entrada,  $\dot{E}_{sai}$  é a taxa de energia de saída e  $\dot{E}_g$  é a taxa de energia térmica que é gerada no volume de controle (INCROPERA, 2007).

$$\dot{E}_{acu} = \dot{E}_{ent.} - \dot{E}_{sai} + \dot{E}_g \quad (5)$$

As principais correntes de calor associadas à câmara são o ar frio que entra pelo sistema de refrigeração, o ar que sai da câmara, a entrada de calor pela abertura da porta, a passagem de calor por condução pelas paredes e a geração de calor pela fermentação das esponjas. A Figura 10 apresenta um esquema da câmara com suas principais correntes de calor consideradas na modelagem matemática.

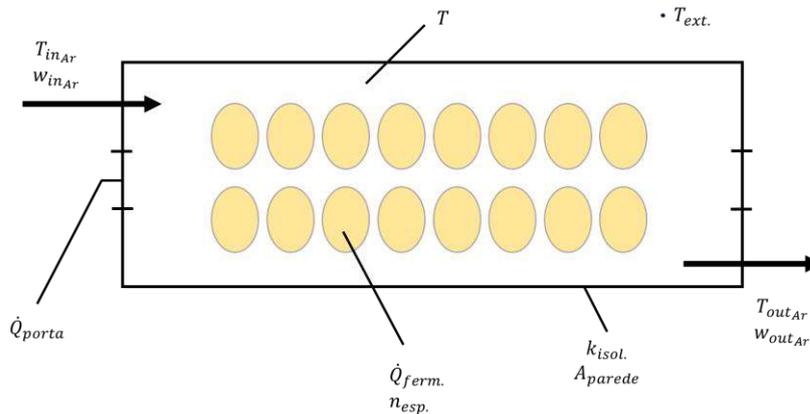


Figura 10 - Esquema da câmara de fermentação

Fonte: Autor

As correntes de entrada de calor na câmara são representadas pela Equações 6 e 7. Na Equação 6,  $\dot{Q}_{in}$  é a taxa de calor devido à entrada de ar na câmara, e  $\dot{Q}_{cond.}$  é a taxa de calor devido à condução térmica pelas paredes. Considerou-se  $\dot{Q}_{cond.}$  como taxa de entrada na equação devido à condição de  $T_{ext} > T$ .

$$\dot{E}_{ent.} = \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{porta} + \dot{Q}_{cond.} \quad (6)$$

Abrindo os termos da Equação 6 obtém-se a Equação 7, onde  $w_{in}$  é a vazão mássica de ar de entrada,  $C_{par}$  é o calor específico do ar,  $T_{in}$  é a temperatura do ar na entrada,  $\dot{Q}_{porta}$  é a taxa de calor devido à abertura das portas da câmara,  $k$  é a condutividade térmica do material isolante da parede,  $L$  é a espessura da parede,  $A$  é a área superficial total das paredes e  $T_{ext}$  é a temperatura do lado externo.

$$\dot{E}_{ent.} = w_{in} \cdot C_{par} \cdot T_{in} + \dot{Q}_{porta} + \frac{k}{L} \cdot A \cdot (T_{ext} - T) \quad (7)$$

A corrente de saída de calor na câmara é representada pelas Equações 8 e 9. Na Equação 8,  $\dot{Q}_{out}$  é a taxa de calor devido à saída de ar na câmara. Abrindo o termo da Equação 8 obtém-se a Equação 9, onde  $w_{out}$  é a vazão mássica de ar que sai da câmara e  $T_{out}$  é a temperatura do ar de saída. Assumindo que dentro da câmara ocorre uma homogeneização perfeita dos gases é possível afirmar que  $T_{out}$  será igual à temperatura da câmara  $T$ .

$$\dot{E}_{sai} = \dot{Q}_{out} \quad (8)$$

$$\dot{E}_{sai} = w_{out} \cdot C_{par} \cdot T_{out} = w_{out} \cdot C_{par} \cdot T \quad (9)$$

Na Equação 10 temos a geração de energia dentro da câmara devido à fermentação das esponjas, sendo que  $\dot{Q}_{ferm.}$  é a taxa de calor gerado por uma esponja e  $n_{esp}$  é o número de esponjas na câmara.

$$\dot{E}_g = \dot{Q}_{ferm.} \cdot n_{esp} \quad (10)$$

Como é esperado que a variação de temperatura dentro da câmara seja entre 28 e 40 °C, nessa faixa de temperatura considera-se  $C_{par}$  constante, já que entre 300K e 350K varia pouco (entre 1007 e 1009 J/kg).

Realizando as substituições, obtém-se a Equação 11, tal como descrita por Seborg, 2017:

$$\rho_{ar} \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = w \cdot c_p \cdot (T_{in} - T) + \dot{Q}_{ferm.} \cdot n_{esp} + \dot{Q}_{porta} + \frac{k}{L} \cdot A \cdot (T_{ext} - T) \quad (11)$$

Rearranjando os termos obtém-se a Equação 12.

$$\rho_{ar} \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = c_p \cdot T_{in} \cdot w(t) - c_p \cdot w(t) \cdot T(t) + \dot{Q}_{ferm.} \cdot n_{esp}(t) + \dot{Q}_{porta}(t) + \frac{k}{L} \cdot A \cdot (T_{ext} - T(t)) \quad (12)$$

Para simplificar o modelo, considera-se a hipótese de que  $\dot{Q}_{ferm.}$  e  $\rho_{ar}$  sejam constantes. Analisando as variáveis e parâmetros do modelo (Equação 12), temos nove parâmetros ( $\rho_{ar}, V, c_p, T_{in}, \dot{Q}_{ferm.}, k, L, A$  e  $T_{ext}$ ) e quatro variáveis ( $w, T, n_{esp}, \dot{Q}_{porta}$ ).

### 3.3 Linearização do modelo matemático

A Equação 12 possui o termo  $w(t) \cdot T(t)$  que torna a equação não linear. Segundo Seborg (2017), a teoria clássica de controle de processos foi desenvolvida para processos lineares e seu uso, portanto, é restrito a aproximações lineares dos processos não lineares reais. Portanto é necessário linearizar o termo  $w(t) \cdot T(t)$  na equação. Para isso foi feita uma aproximação utilizando expansão em série de Taylor em torno de valores estacionários (Equação 13), desprezando as derivadas de ordem superior a 1, chegando-se à Equação 14.

$$f(x_1, x_2) \cong f(\bar{x}_1, \bar{x}_2) + \left[ \frac{df}{dx_1} \right]_{(\bar{x}_1, \bar{x}_2)} \cdot (x_1 - \bar{x}_1) + \left[ \frac{df}{dx_2} \right]_{(\bar{x}_1, \bar{x}_2)} \cdot (x_2 - \bar{x}_2) \quad (13)$$

$$f(w, T) \cong \bar{w} \cdot \bar{T} + \bar{T} \cdot (w(t) - \bar{w}) + \bar{w} \cdot (T(t) - \bar{T}) \quad (14)$$

Aplicando a Equação 14 na Equação 12 obtém-se a Equação 15. Reorganizando os termos chega-se à Equação 16.

$$\rho_{ar} \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = c_p \cdot T_{in} \cdot w(t) - c_p \cdot \bar{w} \cdot \bar{T} - c_p \cdot \bar{T} \cdot (w(t) - \bar{w}) - c_p \cdot \bar{T} \cdot (w(t) - \bar{w}) \quad (15)$$

$$+ \dot{Q}_{ferm.} \cdot n_{esp}(t) + \dot{Q}_{porta}(t) + \frac{k}{L} \cdot A \cdot (T_{ext} - T(t))$$

$$\rho_{ar} \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = c_p \cdot (T_{in} - \bar{T}) \cdot w(t) - c_p \cdot \bar{w} \cdot T(t) + c_p \cdot \bar{w} \cdot \bar{T} + \dot{Q}_{ferm.} \cdot n_{esp}(t) + \dot{Q}_{porta}(t) \quad (16)$$

$$+ \frac{k}{L} \cdot A \cdot (T_{ext} - T(t))$$

### 3.4 Funções de transferência do modelo matemático

Para obter-se as funções de transferência do modelo é necessário reescrever os termos como variáveis de desvio. Igualando a derivada a zero na Equação 16, tem-se o balanço em regime estacionário (Equação 17) no qual os termos com barra acima denotam o valor nominal no estado estacionário.

$$0 = c_p \cdot (T_{in} - \bar{T}) \cdot \bar{w} - c_p \cdot \bar{w} \cdot \bar{T} + c_p \cdot \bar{w} \cdot \bar{T} + \dot{Q}_{ferm.} \cdot \bar{n}_{esp} + \bar{Q}_{porta} + \frac{k}{L} \cdot A \cdot (T_{ext} - \bar{T}) \quad (17)$$

Subtraindo a Equação 17 da Equação 16 obtém-se a Equação 18, na qual os termos com traço são chamados variáveis de desvio.

$$T' = T - \bar{T}$$

$$\rho_{ar} \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{dT'}{dt} = c_p \cdot (T_{in} - \bar{T}) \cdot w' - c_p \cdot \bar{w} \cdot T' + \dot{Q}_{ferm.} \cdot n'_{esp} + \dot{Q}'_{porta} + \frac{k}{L} \cdot A \cdot (T_{ext} - T') \quad (18)$$

Aplicando transformada de Laplace para cada termo da Equação 18 obtém-se a Equação 25, sendo as Equações 19 à 24, a transformada de Laplace para os termos  $\rho_{ar} \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{dT'(t)}{dt}$ ,  $w'(t)$ ,  $c_p \cdot \bar{w} \cdot T'(t)$ ,  $n'_{esp}(t)$ ,  $\dot{Q}'_{porta}(t)$  e  $\frac{k}{L} \cdot A \cdot T'(s)$ , respectivamente.

$$\mathcal{L} \left( \rho_{ar} \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{dT'(t)}{dt} \right) = \rho_{ar} \cdot V \cdot c_p \cdot s \cdot T'(s) - T'(0) = \rho_{ar} \cdot V \cdot c_p \cdot s \cdot T'(s) \quad (19)$$

$$\mathcal{L}(c_p \cdot (T_{in} - \bar{T}) \cdot w'(t)) = c_p \cdot (T_{in} - \bar{T}) \cdot w'(s) \quad (20)$$

$$\mathcal{L}(c_p \cdot \bar{w} \cdot T'(t)) = c_p \cdot \bar{w} \cdot T'(s) \quad (21)$$

$$\mathcal{L}(\dot{Q}_{ferm.} \cdot n'_{esp}(t)) = \dot{Q}_{ferm.} \cdot n'_{esp}(s) \quad (22)$$

$$\mathcal{L}(\dot{Q}'_{porta}(t)) = \dot{Q}'_{porta}(s) \quad (23)$$

$$\mathcal{L}\left(\frac{k}{L} \cdot A \cdot (T_{ext} - T'(t))\right) = \frac{k}{L} \cdot A \cdot T_{ext} - \frac{k}{L} \cdot A \cdot T'(s) \quad (24)$$

$$c_p \left( \rho_{ar} \cdot V \cdot s + \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \right) \cdot T'(s) = c_p \cdot (T_{in} - \bar{T}) \cdot w'(s) + \dot{Q}_{ferm.} \cdot n'_{esp}(s) + \dot{Q}'_{porta}(s) + \frac{k}{L} \cdot A \cdot T_{ext} \quad (25)$$

Rearranjando os termos para deixar apenas  $T'(s)$  do lado esquerdo obtêm-se a Equação 26. Reorganizando o denominador para ficar similar a uma função de transferência de primeira ordem obtêm-se a Equação 27.

$$T'(s) = \frac{(T_{in} - \bar{T})}{\left( \rho_{ar} \cdot V \cdot s + \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \right)} \cdot w'(s) + \frac{\dot{Q}_{ferm.}}{c_p \left( \rho_{ar} \cdot V \cdot s + \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \right)} \cdot n'_{esp}(s) + \frac{1}{c_p \left( \rho_{ar} \cdot V \cdot s + \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \right)} \cdot \dot{Q}'_{porta}(s) + \frac{\frac{k}{L} \cdot A}{c_p \left( \rho_{ar} \cdot V \cdot s + \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \right)} \cdot T_{ext} \quad (26)$$

$$T'(s) = \frac{(T_{in} - \bar{T})}{\left( \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \cdot A \right) \cdot \left( \frac{\rho_{ar} \cdot V}{\left( \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \cdot A \right)} \cdot s + 1 \right)} \cdot W'(s) + \frac{\dot{Q}_{ferm.}}{c_p \cdot \left( \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \cdot A \right) \cdot \left( \frac{\rho_{ar} \cdot V}{\left( \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \cdot A \right)} \cdot s + 1 \right)} \cdot N'_{esp}(s) + \frac{1}{c_p \cdot \left( \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \cdot A \right) \cdot \left( \frac{\rho_{ar} \cdot V}{\left( \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \cdot A \right)} \cdot s + 1 \right)} \cdot \dot{Q}'_{porta}(s) + \frac{\frac{k}{L} \cdot A}{c_p \cdot \left( \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \cdot A \right) \cdot \left( \frac{\rho_{ar} \cdot V}{\left( \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \cdot A \right)} \cdot s + 1 \right)} \cdot T_{ext} \quad (27)$$

$$\text{Substituindo } \tau = \frac{\rho_{ar} \cdot V}{\left( \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \cdot A \right)}, K_p = \frac{(T_{in} - \bar{T})}{\left( \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \cdot A \right)}, K_{d1} = \frac{\dot{Q}_{ferm.}}{c_p \cdot \left( \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \cdot A \right)}, K_{d2} = \frac{1}{c_p \cdot \left( \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \cdot A \right)} \text{ e}$$

$$K_{d3} = \frac{\frac{k}{L} \cdot A}{c_p \cdot \left( \bar{w} + \frac{k}{L \cdot cp} \cdot A \right)} \text{ na Equação 27 obtêm-se a Equação 28.}$$

$$T'(s) = \frac{K_p}{\tau \cdot s + 1} \cdot W'(s) + \frac{K_{d1}}{\tau \cdot s + 1} N'_{esp}(s) + \frac{K_{d2}}{\tau \cdot s + 1} \cdot \dot{Q}'_{porta}(s) + \frac{K_{d3}}{\tau \cdot s + 1} \cdot T_{ext} \quad (28)$$

Substituindo  $G_p(s) = \frac{K_p}{\tau \cdot s + 1}$ ,  $G_{d1}(s) = \frac{K_{d1}}{\tau \cdot s + 1}$ ,  $G_{d2}(s) = \frac{K_{d2}}{\tau \cdot s + 1}$  e  $G_{d3}(s) = \frac{K_{d3}}{\tau \cdot s + 1}$  na Equação 28 obtêm-se a Equação 29.

$$T'(s) = G_p(s) \cdot W'(s) + G_{d1}(s) \cdot N'_{esp}(s) + G_{d2}(s) \cdot \dot{Q}'_{porta}(s) + G_{d3}(s) \cdot T_{ext} \quad (29)$$

## 4 METODOLOGIA

Com objetivo de manter a temperatura da câmara de fermentação em 28°C, valor médio de temperatura para fermentação da massa de biscoito *cream cracker* sugerido por Manley (2001) e Bertolino e Braga (2017) (26 à 30°C), faz-se necessária a modelagem matemática deste sistema e obter-se as funções de transferência deste modelo, realizada no Capítulo 3. Após o modelo criado é necessário obter a energia gerada pela fermentação da esponja ( $\dot{Q}_{ferm.}$ ), a vazão mássica de ar no estado estacionário ( $\bar{w}$ ), criar a malha de controle, sintonizar o controlador PID, para, no final, verificar as respostas dinâmicas desta malha à perturbação degrau no *setpoint* nas variáveis de distúrbio.

### 4.1 Cálculo da energia gerada pela fermentação da esponja ( $\dot{Q}_{ferm.}$ ) e vazão mássica de ar no estado estacionário ( $\bar{w}$ )

Para obtenção do valor aproximado do calor de fermentação foi realizado o acompanhamento hora a hora da variação da temperatura de uma esponja fermentando por 12 h e a partir destes dados definiu-se a quantidade de calor gerada (em W/K). O experimento foi feito em escala real com equipamentos industriais e pelas dificuldades locais não foram feitas replicações.

No experimento foi utilizada a formulação da Tabela 2, similar à formulação proposta por Davidson (2016). Após a adição dos ingredientes, a esponja foi homogeneizada por 5 min em uma Maseira industrial a 24 rpm e colocada para fermentar em temperatura ambiente. Para a medição da temperatura da esponja foi utilizando um termômetro portátil da marca AKSO modelo AK904 e para medição da temperatura ambiente foi utilizado um termo-higrômetro da marca AKSO modelo AK28.

Tabela 2 - Formulação para Esponja de *Cream Cracker*

Receita - Esponja de biscoito Cream Cracker	
Ingredientes	%
Farinha de Trigo Salgada	68%
Água	29%
Açúcar	2%
Fermento Biológico Fresco	1%

Para obter o calor de fermentação foi feito o balanço de energia para a esponja, considerando que não há gradiente de temperatura dentro da esponja, ou seja, condução instantânea e desconsiderando a troca térmica por radiação, assumindo que o aumento na temperatura da esponja está relacionado à energia liberada na fermentação e o aumento é feito uniformemente por todo seu volume. No final do balanço obteve-se a Equação 30, de acordo com Incropera (2007), onde  $T_o$  e  $T_f$  são a temperatura da esponja no início e final do experimento,  $T_\infty$  é a temperatura ambiente,  $h$  é o coeficiente convectivo,  $A_s$  é a área superficial do carrinho de esponja,  $m$  é a massa e  $c_p$  é o calor

específico da esponja. Assumiu-se  $T_{\infty}$  constante durante o experimento sendo a média da temperatura ambiente ao longo do experimento.

$$\frac{T_f - T_{\infty} - \frac{b}{a}}{T_o - T_{\infty} - \frac{b}{a}} = e^{-a \cdot t} \quad (30)$$

$$a = \frac{h \cdot A_s}{m \cdot c_p} \quad \text{e} \quad b = \frac{\dot{Q}_{ferm.}}{m \cdot c_p}$$

Para obter a vazão mássica de ar no estado estacionário foi utilizado a Equação 17 assumindo os valores para as variáveis  $T_{in}$ ,  $\bar{T}$ ,  $\dot{Q}_{ferm.}$ ,  $\bar{n}_{esp}$ ,  $\bar{Q}_{porta}$  e  $c_p$ .

#### 4.2 Desenvolvimento do sistema de controle para a câmara de fermentação

Para desenvolver o controlador do tipo feedback para a câmara de fermentação foi utilizado o software *Simulink*, considerado como variável controlada a temperatura do ar da câmara ( $T$ ), pois essa variável impacta diretamente a temperatura da esponja, afetando a fermentação. Para medi-la utiliza-se um transmissor elétrico. A variável manipulada selecionada foi a vazão da corrente de ar frio ( $w$ ). Os distúrbios a serem estudados foram o número de esponjas ( $n_{esp}$ ), abertura da porta da câmara ( $\dot{Q}_{porta}$ ) e entrada de calor por condução pelas paredes ( $T_{ext}$ ).

O objetivo do controlador é manter a temperatura entre 26 e 30°C com *setpoint* em 28°C, com o menor tempo de estabilização possível e com *overshoot* menor que 10% com o objetivo de obter uma resposta suave. O critério de avaliação entre os métodos de sintonia do controlador é a minimização da integral de valor absoluto de erro (IAE, em inglês). Outros índices de performance como tempo de subida e tempo de estabilização também serão apresentados.

#### 4.3 Premissas iniciais

Utilizando as funções de transferências obtidas do modelo matemático foi desenvolvida uma malha de controle no *Simulink* (Figura 11). O fluxograma inicia-se com um degrau no *setpoint* chamado de YSP que em seguida é enviado para um bloco de conversão que utiliza a função de transferência  $K_m$ , responsável por converter o *setpoint* da variável física em sinal padrão elétrico. Esse sinal é comparado com a variável medida que anteriormente passou por um sensor, com função de transferência  $G_m$ .

A partir da diferença entre esses dois sinais é gerado um erro que passa pelo controlador PID, gerando uma resposta. Essa resposta será encaminhada para um elemento de controle com função de transferência  $G_v$ , nesse caso uma válvula linear que atua na vazão de ar frio. Então, essa ação de controle terá um efeito no processo através de  $G_p$ .

Ainda tem-se um degrau no distúrbio 1 chamado de  $N_{esp}$ , representando a entrada e saída de esponja da câmara, que terá um efeito na variável controlada através da função de transferência de distúrbio ( $Gd1$ ), um degrau no distúrbio 2 chamado de  $Q_{porta}$  que terá um efeito na variável controlada através da função de transferência de distúrbio ( $Gd2$ ) e um degrau no distúrbio 3 chamado  $D3$ , representando a entrada de calor pelas paredes da câmara, que terá um efeito na variável controlada através da função de transferência de distúrbio ( $Gd3$ ). O sinal oriundo de  $Gd1$ ,  $Gd2$  e  $Gd3$  combinam-se com o sinal proveniente de  $Gp$  e a variável medida é, em seguida, aferida novamente, reiniciando o ciclo.

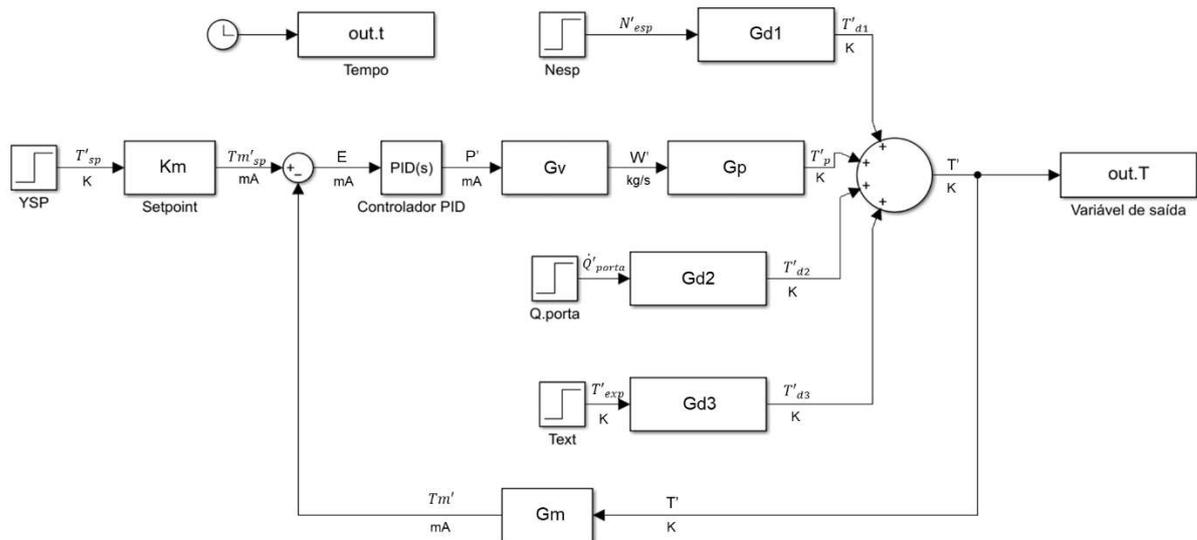


Figura 11 - Diagrama de blocos para a Câmara de fermentação

Fonte: Autor

Como as funções de transferência do processo e dos distúrbios,  $Gp(s)$ ,  $Gd1(s)$ ,  $Gd2(s)$  e  $Gd3(s)$ , respectivamente, já foram obtidas na etapa da modelagem, é necessário definir as demais funções de transferência do problema. Para obter  $Gm$  utilizou-se a Equação 31.

$$Gm(s) = \frac{Km}{\tau_m s + 1} \quad (31)$$

Assumindo uma dinâmica muito rápida para o sensor em comparação aos longos tempos do processo, já que o tempo de atuação do sensor é na ordem de segundos e o processo pode chegar a demorar minutos para estabilizar, pode-se aproximar  $Gm$  a  $Km$ , sendo que o valor de  $Km$  é obtido através da Equação 32. A faixa de temperatura de trabalho da câmara fica entre 28 e 40°C, logo, para abranger possíveis variações no processo, foi escolhido utilizar a faixa de 20 à 50°C.

$$Km = \frac{\Delta \text{sinal padrão elétrico}}{\Delta \text{temperatura}} = \frac{20 - 4}{50 - 20} = 0,533 \frac{\text{mA}}{^\circ\text{C}} \text{ ou } \frac{\text{mA}}{\text{K}} \quad (32)$$

Para obter  $Gv$  utilizou-se a Equação 33.

$$Gv = \frac{Kv}{\tau_v s + 1} \quad (33)$$

Utilizando a mesma comparação feita anteriormente entre o tempo do sensor e o tempo do processo, já que o tempo de atuação da válvula também é na ordem de segundos, pode-se aproximar  $Gv$  por  $Kv$ . Sendo assim, obtém-se o valor de  $Kv$  através da Equação 34. Para o processo considerou-se uma válvula do tipo linear, de forma que pode ser assumida uma relação linear entre a vazão de ar e a abertura da válvula.

Cabe ressaltar que  $Kv$  inclui a conversão do sinal elétrico oriundo do controlador em sinal pneumático (constante  $C1$ ), a conversão da posição do sinal pneumático em uma posição da válvula ( $K_{atuador}$ ) e a conversão da posição da válvula em relação à faixa de vazão da utilidade ( $K_{corpo}$ ). Os equipamentos utilizados para resfriar a câmara são 2 *Fancoil* de 20TR da Hitachi, cada um com capacidade de vazão mássica de 1,75 kg/s, totalizando 3,5 kg/s.

$$Kv = C_1 \cdot K_{atuador} \cdot K_{corpo} = \frac{15 - 3}{20 - 4} \cdot \frac{1 - 0}{15 - 3} \cdot \frac{3,5 - 0}{1 - 0} = 0,21875 \frac{kg}{s \cdot mA} \quad (34)$$

#### 4.4 Sintonia do controlador ( $G_c$ ) pelo método de síntese direta

Para obter-se a função de transferência do controlador pelo método de síntese direta é necessário partir do diagrama de blocos da Seção 4.2 e a Equação 35 (SEBORG *et. al*, 2017) que é a função de transferência de malha fechada para mudanças de *setpoint*, onde  $G$  é igual a  $Gv \cdot Gp$  e  $Gm$  e  $T_{sp}$  é a temperatura do *setpoint*. Reorganizando a equação 35 obtém-se a Equação 36.

$$\frac{T}{T_{sp}} = \frac{G_c \cdot G}{1 + G_c \cdot G} \quad (35)$$

$$G_c = \frac{1}{G} \cdot \frac{T/T_{sp}}{1 - T/T_{sp}} \quad (36)$$

O desempenho do controlador na Equação 36 depende fortemente da especificação da função de transferência de malha fechada desejada,  $T/T_{sp}$ . Idealmente, gostaríamos de ter  $T/T_{sp} = 1$  para que a variável controlada rastresse o ponto de ajuste instantaneamente sem qualquer erro. No entanto, esta situação ideal, chamada de controle perfeito, não pode ser alcançada pelo controle realimentado porque o controlador não responde até que o erro seja diferente de 0. Para processos sem atrasos de tempo e modelo de 1ª ordem tem-se a Equação 37 (SEBORG *et. al*, 2017) onde  $\tau_c$  é a constante de tempo de malha fechada desejada. Este modelo tem um tempo de estabilização de aproximadamente  $5\tau_c$ .

$$\frac{T}{T_{sp}} = \frac{1}{\tau_c s + 1} \quad (37)$$

Substituindo a Equação 37 na Equação 36 e resolvendo para  $G_c$ , obtém-se a Equação 38 (SEBORG *et. al*, 2017).

$$G_c = \frac{1}{G} \cdot \frac{1}{\tau_c s} \quad (38)$$

O termo  $1/\tau_c s$  fornece ação de controle integral e, portanto, elimina o *offset*. O parâmetro de projeto  $\tau_c$  fornece um parâmetro conveniente de ajuste do controlador que pode ser usado para tornar o controlador mais agressivo ( $\tau_c$  pequeno) ou menos agressivo ( $\tau_c$  grande) (SEBORG *et. al*, 2007). Considerando  $G$  como um modelo de sistema de 1ª ordem sem tempo morto, teria seria uma função de transferência  $G = \frac{K}{\tau s + 1}$ . Substituindo  $G$  na Equação 38 obtém a Equação 39. Fazendo uma analogia ao controlador PI, o primeiro termo  $\frac{1}{K} \left( \frac{\tau}{\tau_c} \right)$  seria  $K_p$  (ação proporcional) e o segundo termo  $\tau$  seria  $\tau_i$  (ação integrativa)

$$G_c = \frac{\tau s + 1}{K} \cdot \frac{1}{\tau_c s} = \frac{1}{K} \left( \frac{\tau}{\tau_c} \right) \cdot \left( 1 + \frac{1}{\tau s} \right) \quad (39)$$

Para o valor de  $\tau_c$  é sugerido que se utilize  $\tau_c > 0,1 \tau$  ou  $\tau_c = \tau/3$  (SEBORG *et. al*, 2017). Neste trabalho utilizou-se  $\tau_c = \tau/3$ .

#### 4.5 Sintonia do controlador no *Simulink*

Utilizando o diagrama de blocos da Seção 4.2 foi desenvolvida uma malha no *Simulink* para sintonizar o controlador. Foram utilizados três métodos de sintonia: tentativa e erro, a ferramenta *Autotuning* do *Matlab*® e síntese direta. Na Figura 12 é possível verificar um esquema simplificado do procedimento realizado para tentativa e erro e *autotuning*.

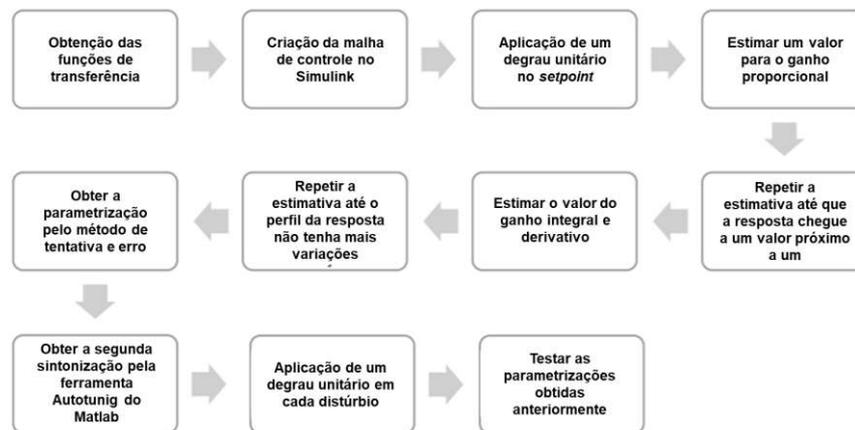


Figura 12 - Esquema simplificado para sintonizar o controlador por tentativa e erro e *autotuning*.

Fonte: Autor

Para sintonizar o controlador utilizando o *Autotuning* do *Matlab*® podem ser regulados dois critérios: tempo de resposta (no inglês, *response time*) e comportamento transiente (no inglês, *transient behavior*). Nesse caso foram alterados ambos os critérios. Para sintonizar o controlador utilizando o método de síntese direta foi alterado o parâmetro  $\tau_c$ .

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Modelagem da transferência de calor na câmara de fermentação

#### 5.1.1 Cálculo da energia gerada pela fermentação da esponja ( $\dot{Q}_{ferm.}$ )

Foi realizado o acompanhamento hora a hora da variação da temperatura de uma esponja fermentando por 12 h. A Tabela 3 mostra a temperatura da esponja e do ambiente ao longo do tempo.

É importante observar que durante o experimento entre o início até chegar a 6 h de fermentação ocorreu o aumento da temperatura da esponja devido à fermentação e pela troca com o ar ambiente. A partir de 7 h de fermentação, a esponja está em uma temperatura maior que a do ambiente, logo é possível assumir que deste ponto em diante o aumento de temperatura é consequência da energia liberada na fermentação.

Tabela 3 - Temperatura da esponja durante o experimento.

<b>ACOMPANHAMENTO DA TEMPERATURA DA ESPONJA</b>		
<b>Horas de fermentação</b>	<b>Temperatura - Esponja</b>	<b>Temperatura - Ambiente</b>
<b>Início</b>	26	28,7
<b>1 h</b>	26,4	29,7
<b>2 h</b>	27	29,2
<b>3 h</b>	27	29,7
<b>4 h</b>	27,3	29,1
<b>5 h</b>	27,9	28,6
<b>6 h</b>	28,4	28,8
<b>7 h</b>	29	28,5
<b>8 h</b>	29,6	29
<b>9 h</b>	30,3	28,55
<b>10 h</b>	31	29
<b>11 h</b>	32,2	28,6
<b>12 h</b>	33,4	27

Substituindo os parâmetros  $h = 1,74 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  (Apêndice 1),  $As = 5,64 \text{ m}^2$ ,  $m = 292 \text{ kg}$ ,  $cp = 1212,52 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  (Apêndice 2),  $t = 18.000 \text{ s}$ ,  $T_o = 302,15 \text{ K}$  (29°C),  $T_\infty = 301,59 \text{ K}$  (28,4°C) (média da temperatura ambiente entre 7h a 12h de fermentação) e  $T_f = 306,55 \text{ K}$  (33,4°C) na Equação 27 e utilizando a ferramenta *Solve Equation* da HP 50g, os seguintes valores para  $b$  e  $\dot{Q}_{ferm.}$  foram encontrados:

$$b = 3,26 \cdot 10^{-4} \frac{K}{s} = \frac{\dot{Q}_{ferm.}}{292 \text{ kg} \cdot 1212,52 \frac{J}{\text{kg} \cdot K}} \rightarrow \dot{Q}_{ferm.} = 115 \frac{J}{s} = 115 \text{ W}$$

### 5.1.2 Cálculo da vazão mássica de ar no estado estacionário ( $\bar{w}$ )

Para obter a vazão mássica de ar no estado estacionário foi utilizada a Equação 17 assumindo os valores para as variáveis  $T_{in} = 297,15 \text{ K}$  ( $24^\circ\text{C}$ ),  $\bar{T} = 301,15 \text{ K}$  ( $28^\circ\text{C}$ , temperatura do *setpoint* do controlador),  $\dot{Q}_{ferm.} = 115 \text{ W/K}$ ,  $\bar{n}_{esp} = 60$  (número máximo de esponjas na câmara),  $\bar{Q}_{porta} = 155 \text{ W}$  (Apêndice 3),  $c_p = 1007 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  para ar a  $300 \text{ K}$  (INCROPERA, 2007),  $k = 0,026 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  para isolante poliuretano (INCROPERA, 2007),  $L = 0,1 \text{ m}$ ,  $A = 10.456,6 \text{ m}^2$  e  $T_{ext} = 303,15 \text{ K}$  ( $30^\circ\text{C}$ ). Resolvendo a Equação 17 tem-se que:

$$0 = 1007 \frac{J}{\text{kg} \cdot K} \cdot (297,15 - 301,15) K \cdot \bar{w} + 115 \text{ W} \cdot 60 + 155 \text{ W} + \frac{0,026 \frac{W}{\text{m} \cdot K}}{0,1 \text{ m}} \cdot 10.456,6 \text{ m}^2 \cdot (303,15 - 301,15) K$$

$$\bar{w} = 3,1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

### 5.1.3 Parâmetros de processo e funções de transferência da modelagem

Utilizando os parâmetros de processo foram obtidas as funções transferência para o sistema estudado. Os parâmetros e funções de transferência foram agrupados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de processo e funções de transferência

Parâmetros de processo				Funções de transferência	
$T_{in} [K]$	297,15	$\dot{Q}_{ferm.} [W]$	115	$G_p(s) \left[ \frac{K}{\text{kg}} \right]$	$\frac{-0,69}{137,06 \cdot s + 1}$
$\bar{w} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$	3,1	$\dot{Q}_{porta} [W]$	155	$G_{d1}(s) [K]$	$\frac{0,0197}{137,06 \cdot s + 1}$
$\rho_{ar} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	1,16	$T_{ext} [K]$	303,15	$G_{d2}(s) \left[ \frac{K}{W} \right]$	$\frac{0,00017}{137,06 \cdot s + 1}$
$V [m^3]$	685,3	$\tau [s]$	137,06	$G_{d3}(s) [m^2]$	$\frac{0,4655}{137,06 \cdot s + 1}$
$\bar{T} [K]$	301,15	$K_p \left[ \frac{K \cdot s}{\text{kg}} \right]$	-0,69	$G_m(s) \left[ \frac{\text{mA}}{K} \right]$	0,533
$c_p \left[ \frac{J}{\text{kg} \cdot K} \right]$	1007	$K_{d1} [K]$	0,0197	$G_v(s) \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{mA}} \right]$	0,21875
$k \left[ \frac{W}{\text{m} \cdot K} \right]$	0,026	$K_{d2} \left[ \frac{K \cdot s}{J} \right]$	0,00017	$G(s) \left[ \frac{1}{s} \right]$	$\frac{-0,040234038}{137,06 \cdot s + 1}$
$L [m]$	0,1	$K_{d3} [m^2]$	0,4655		
$A [m^2]$	10.456,6				

## 5.2 Avaliação do modelo matemático

Utilizando as funções de transferência da Seção 5.1.3 foi gerada a malha de controle aberta no *Simulink*, presente na Figura 13. Realizaram-se dois testes na malha de controle, o primeiro aplicando um degrau com aumento de 10 esponjas na câmara no distúrbio *D1* e um degrau de amplitude 10, que representa a troca térmica por abrir a porta da câmara 10 vezes, no distúrbio *D2* e o segundo aplicando um degrau com aumento de 10°C na Text em distúrbio *D3* em relação ao valor no estado estacionário. O resultado obtido após a aplicação dessas perturbações está representado nas Figuras 14 e 15. O teste nos distúrbios *D1* e *D2* foram realizados de forma conjunta porque ao alterar o número de esponjas na câmara a porta necessariamente é aberta, logo os distúrbios ocorrem ao mesmo tempo.

Aplicando o degrau no número de esponjas e na abertura da porta, observou-se um pequeno aumento na temperatura da câmara estabilizando em 28,2 °C e aplicando um degrau na temperatura externa observou-se um aumento da temperatura estabilizando em 32,5°C. Em ambos os casos a temperatura estabilizou-se, como esperado da modelagem da câmara, mesmo que no caso do distúrbio *D3* a temperatura da câmara ultrapassou a faixa de trabalho.

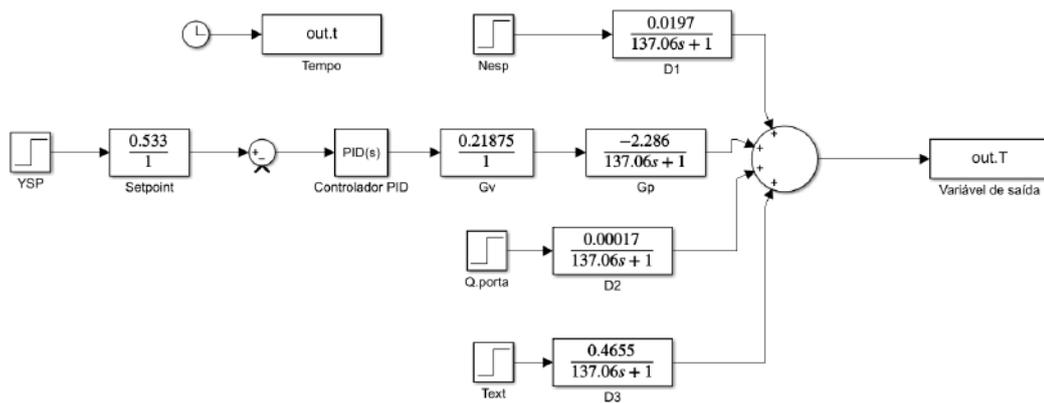


Figura 13 - Diagrama de blocos da malha de controle aberta.

Fonte: Autor

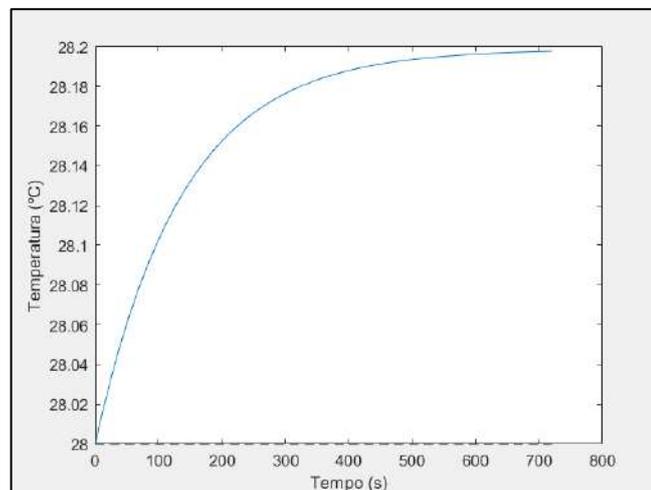


Figura 14 - Resposta para um degrau no distúrbio *D1* e *D2*.

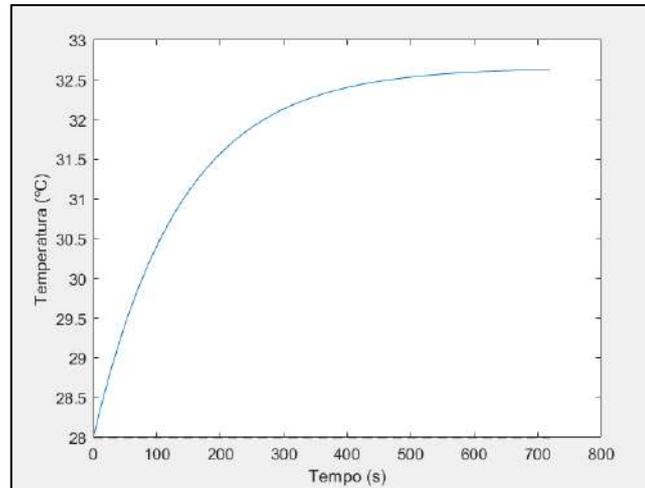


Figura 15 - Resposta para um degrau no distúrbio D3.

Os testes em malha aberta demonstraram que o modelo obtido é estável e corresponde ao comportamento esperado de cada fonte de calor, sendo o distúrbio D3 tendo o maior impacto na variação da temperatura da câmara.

### 5.3 Avaliação dos controladores desenvolvidos

Utilizando as funções de transferência da Seção 5.1.3 foi gerada a malha de controle fechada no *Simulink*, presente na Figura 16. Foram parametrizados três controladores, um utilizando o método “tentativa e erro”, o outro com a ferramenta *Autotuning* do *Simulink* e o último pelo método de Síntese Direta. Conforme descrito anteriormente, foram avaliados três parâmetros para a escolha do melhor controlador: tempo de subida, tempo de estabilização e percentual de *overshoot*.

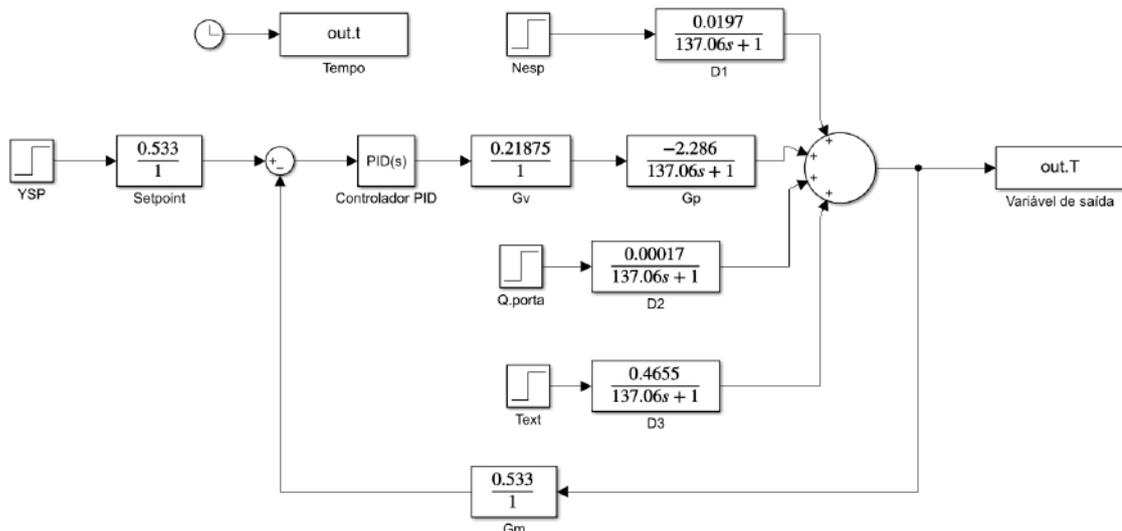


Figura 16 - Diagrama de blocos da malha de controle fechada.

Fonte: Autor

### 5.3.1 Avaliação do controlador – Método tentativa e erro

O controlador PID foi parametrizado pelo método de tentativa e erro com os seguintes parâmetros: Proporcional (corresponde a  $K_c$ ) igual a -120, Integral (corresponde a  $K_c/\tau_i$ ) igual a -1 e derivativo (correspondente a  $K_c \cdot \tau_d$ ) igual a -10.

Em primeiro lugar, foi aplicado um degrau unitário apenas no *setpoint*, indo de 28 para 29°C, e o controlador foi parametrizado pelo método de tentativa e erro. Na Figura 17 encontra-se a resposta obtida utilizando esse controlador. Em seguida, foi analisada a resposta do controlador frente aos Distúrbios D1 (entrada de esponja na câmara) e D2 (abertura da porta) ao mesmo tempo, em seguida foi analisado a resposta frente a D3 (condução pelas paredes). Nas Figuras 18 e 19 encontram-se as respostas obtidas utilizando esse controlador com relação à aplicação de um degrau unitário ao Distúrbio D1 e D2 e um degrau unitário ao Distúrbio D3, respectivamente. Por fim, foi analisada a resposta do controlador à simulação onde ocorre todos os efeitos simultaneamente (mudança no *setpoint* e ação dos três distúrbios) (Figura 20). Os parâmetros de avaliação do controlador para o *setpoint*, cada distúrbio agindo separadamente e todos os efeitos ao mesmo tempo estão compilados na Tabela 5.

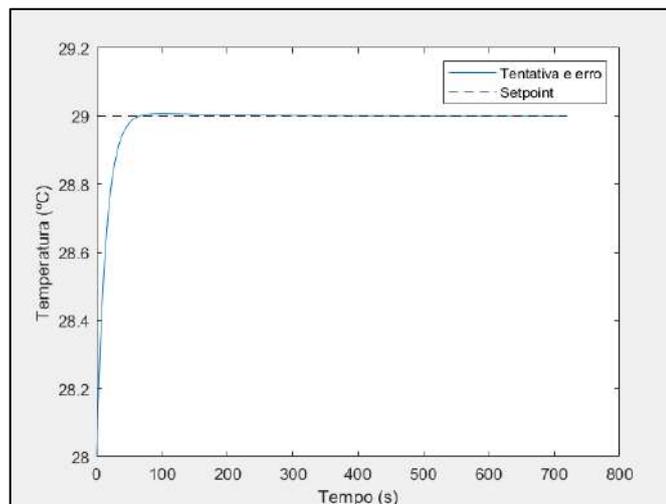


Figura 17 - Resposta para um degrau no *setpoint* utilizando um controlador parametrizado pelo método de tentativa e erro.

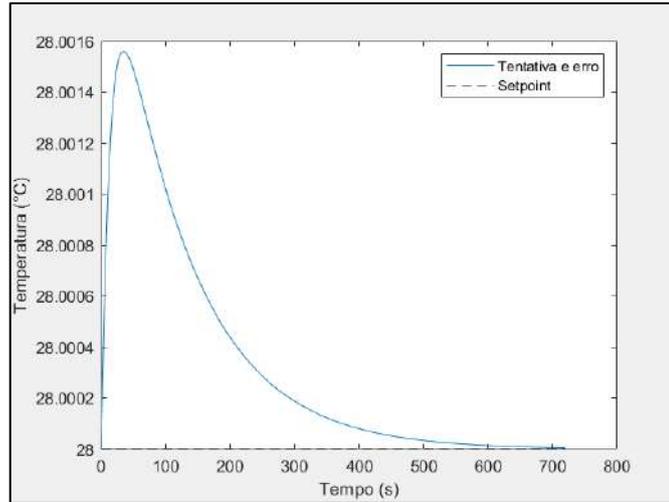


Figura 18 - Resposta para um degrau em D1 e D2 utilizando um controlador parametrizado pelo método de tentativa e erro.

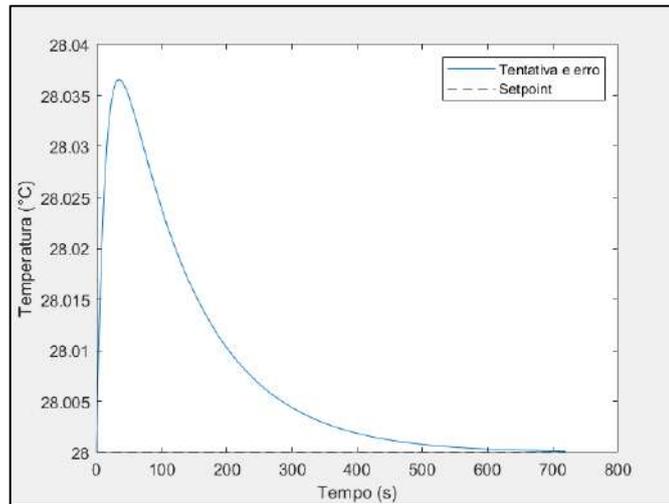


Figura 19 - Resposta para um degrau em D3 utilizando um controlador parametrizado pelo método de tentativa e erro.

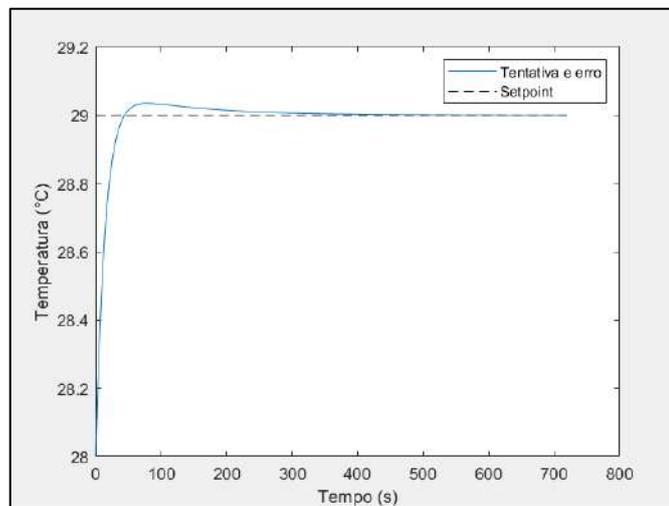


Figura 20 - Resposta para a simulação utilizando um controlador parametrizado pelo método de tentativa e erro.

Tabela 5 - Parâmetros e respostas do controlador parametrizado pelo método de tentativa e erro.

Parâmetros	Setpoint	Distúrbios D1 e D2	Distúrbio D3	Simulação
Tempo de subida [s]	30,4275	0,0295	0,0294	26,3747
Tempo de estabilização [s]	50,1668	493,6075	493,4609	159,3250
Overshoot	0,0244%	0,0055%	0,1301%	0,1200%
IAE	7,85	0,1313	3,076	9,329

Observa-se que utilizando o controlador parametrizado pelo método de tentativa e erro obtém-se uma resposta satisfatória, temperatura entre 26 e 30°C, com o menor tempo de estabilização possível, com *overshoot* menor que 10% e obteve uma resposta suave.

### 5.3.2 Avaliação do controlador – Método *Autotuning*

Em seguida, foi parametrizado um segundo controlador utilizando a ferramenta *Autotuning* do Matlab com o critério de tempo de resposta de 11,00 segundos e o comportamento transiente em 0,9 (o mais robusto possível). Na Figura 21 é possível verificar a resposta obtida para o controlador gerado utilizando o *Autotuning* em comparação com o controlador obtido utilizando o método de tentativa e erro.

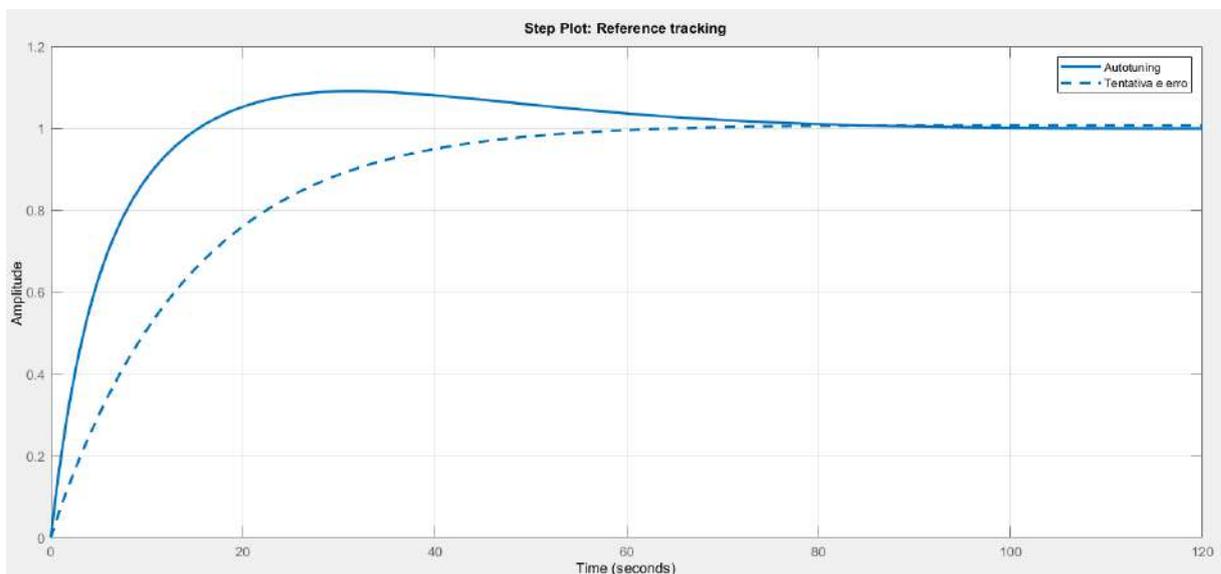


Figura 21 - Resposta comparativa para um controlador utilizando a ferramenta *Autotuning* e para um controlador obtido pelo método de tentativa e erro.

Analisando apenas o gráfico, verifica-se que a resposta obtida para o controlador que utilizou o método *Autotuning* é mais rápida, contudo, é necessário avaliar os outros parâmetros. Na Tabela 6 encontram-se os parâmetros do controlador que permitem realizar uma comparação mais aprofundada entre os dois controladores. Avaliando o tempo de subida, verificou-se que o controlador parametrizado por *Autotuning* possui tempo de subida 66,2% mais rápida, com um tempo de estabilização 40,7% mais

lento e com maior percentual de *overshoot*, ainda dentro das especificações aceitáveis para o controlador, visto ter resultado em um valor inferior a 10%.

Tabela 6 - Parâmetros obtidos para os controladores sintonizados para um degrau no *setpoint*

Parâmetros	Tentativa e Erro	Autotuning
P	-120	-260,8128
I	-1	-11,1593
D	-10	-538,4063
Tempo de subida [s]	30,2	10,2
Tempo de estabilização [s]	49,9	70,2
Overshoot	0,733%	9,04 %

Nas Figuras 22, 23, 24 e 25 encontram-se as respostas obtidas utilizando esse controlador com relação à aplicação de um degrau no *setpoint*, um degrau no Distúrbio D1 e D2, um degrau no Distúrbio D3 e a simulação de todos os efeitos, respectivamente. Os parâmetros de avaliação do controlador para o *setpoint*, cada distúrbio agindo separadamente e todos os efeitos ao mesmo tempo estão compilados na Tabela 7.

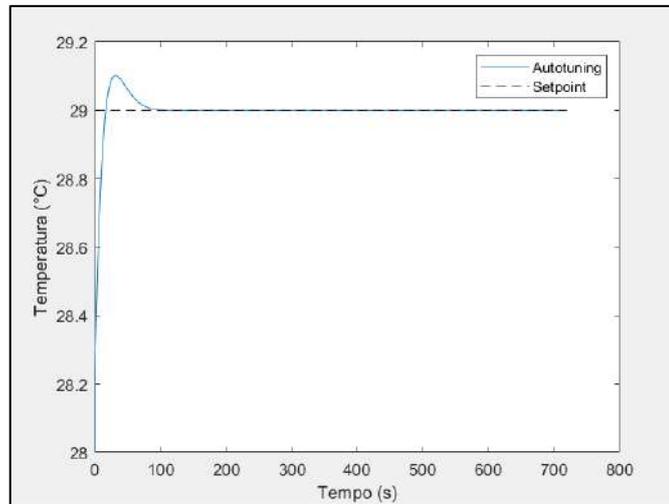


Figura 22 - Resposta para um degrau no *setpoint* utilizando um controlador parametrizado pelo método *autotuning*.

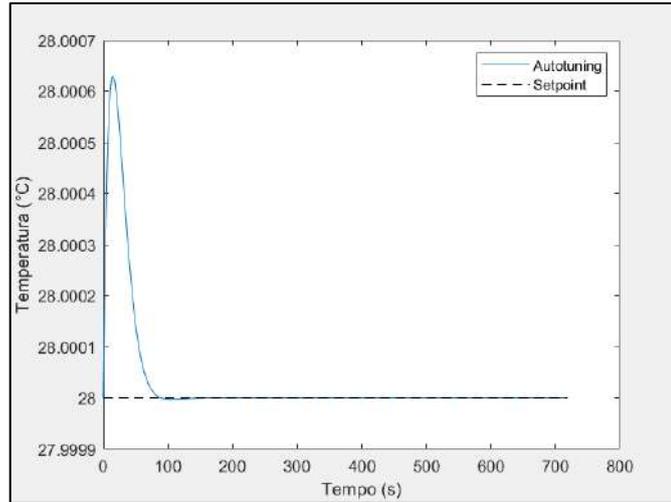


Figura 23 - Resposta para um degrau em D1 e D2 utilizando um controlador parametrizado pelo método *autotuning*.

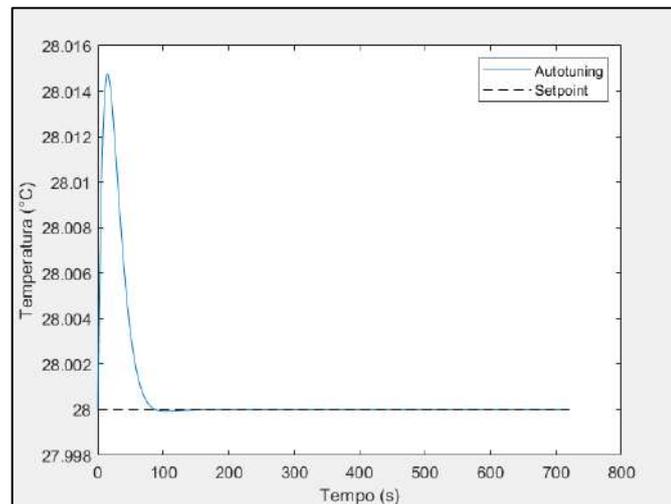


Figura 24 - Resposta para um degrau em D3 utilizando um controlador parametrizado pelo método *autotuning*.

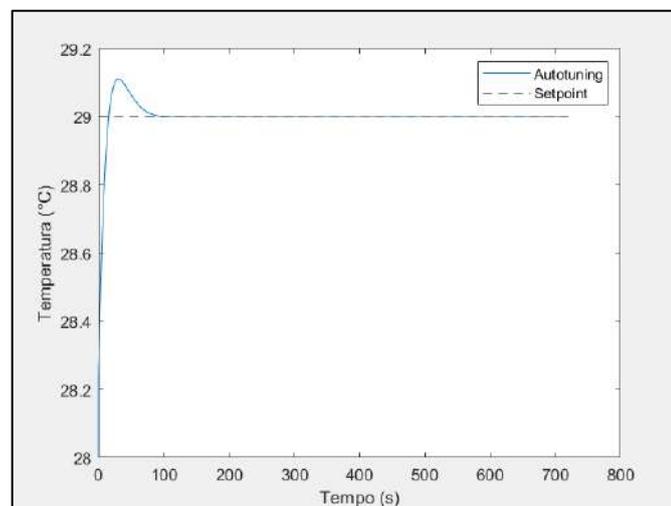


Figura 25 - Resposta para a simulação utilizando um controlador parametrizado pelo método *autotuning*.

Tabela 7 - Parâmetros e resposta do controlador parametrizado pelo método *autotuning*.

Parâmetros	Setpoint	Distúrbios D1 e D2	Distúrbio D3	Simulação
Tempo de subida [s]	12,2563	0,0010	6,5684e-5	11,6947
Tempo de estabilização [s]	68,8618	76,8110	76,3109	69,3175
Overshoot	0,3536%	0,0023%	0,0526%	0,3879%
IAE	4,444	0,0199	0,2789	4,543

### 5.3.3 Avaliação do controlador – Método síntese direta

Para sintonizar o controlador pelo método de síntese direta utilizou-se a Equação 38 com o valor sugerido para  $\tau_c$  por Seborg de  $\tau/3$ , obtendo-se  $\tau_c$  igual a 45,6867 segundos. Utilizando este valor para  $\tau_c$  obtêm-se uma terceira sintonia para o controlador, desta vez com configuração PI e parâmetros P (corresponde a  $K_p$ ) igual a -37,29 e I (corresponde a  $K_p/\tau_i$ ) igual a -0,272072.

$$G = G_v \cdot G_m \cdot G_p = 0,21875 \cdot 0,533 \cdot \frac{-0,69}{137,06s + 1} = \frac{-0,08045}{137,06s + 1}$$

$$G_c = \frac{137,06s + 1}{-0,08045} \cdot \frac{1}{45,6867s} = -37,29018832 - \frac{0,272072}{s} \rightarrow P \cong -37,29 \text{ e } I = -0,272072$$

Nas Figuras 26, 27, 28 e 29 encontram-se as respostas obtidas utilizando esse controlador com relação à aplicação de um degrau no *setpoint*, um degrau no Distúrbio D1 e D2, um degrau no Distúrbio D3 e a simulação de todos os efeitos, respectivamente. Os parâmetros de avaliação do controlador para o *setpoint*, cada distúrbio agindo separadamente e todos os efeitos ao mesmo tempo estão compilados na Tabela 8.

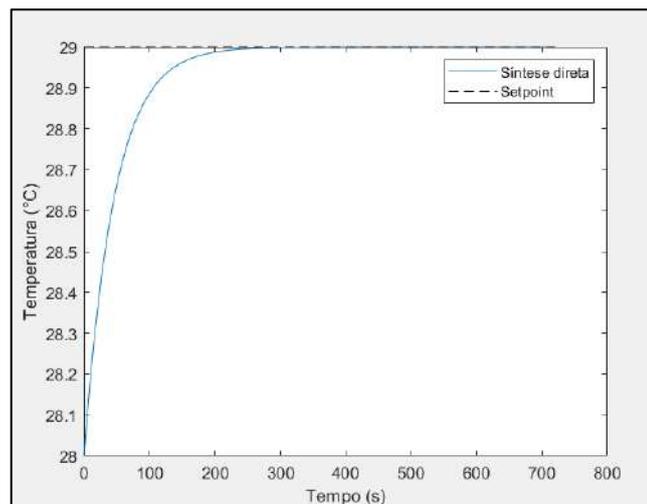


Figura 26 - Resposta para um degrau no *setpoint* utilizando um controlador parametrizado pelo método síntese direta

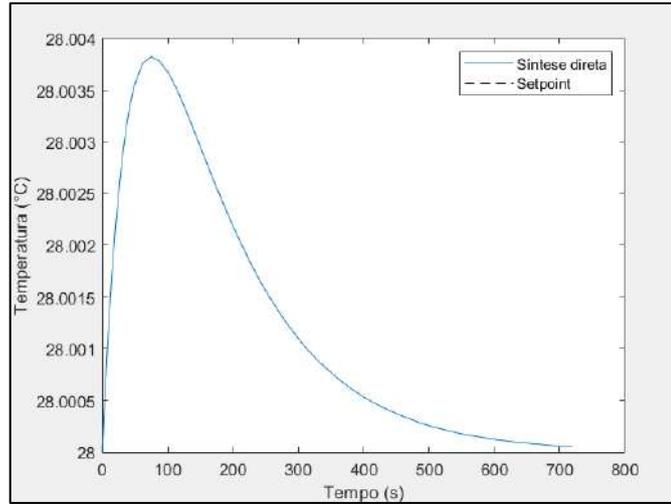


Figura 27 - Resposta para um degrau em D1 e D2 utilizando um controlador parametrizado pelo método síntese direta.

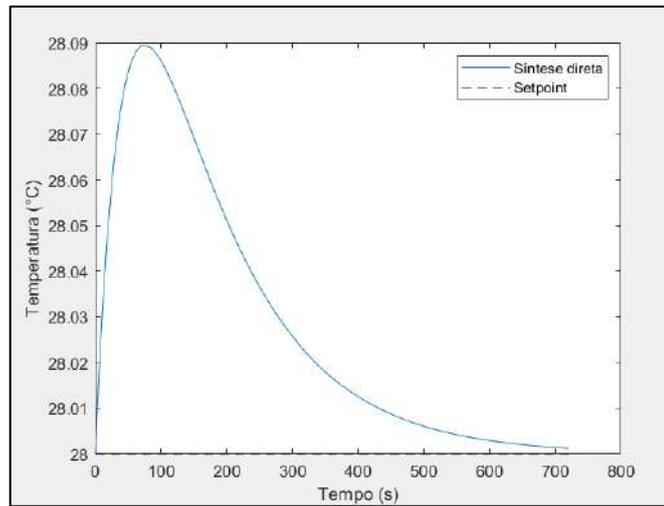


Figura 28 - Resposta para um degrau em D3 utilizando um controlador parametrizado pelo método síntese direta.

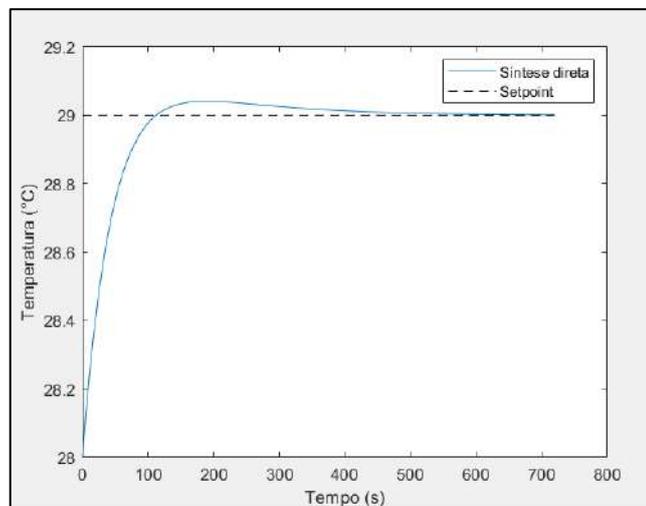


Figura 29 - Resposta para a simulação utilizando um controlador parametrizado pelo método síntese direta.

Tabela 8 - Parâmetros e resposta do controlador parametrizado pelo método síntese direta

Parâmetros	Setpoint	Distúrbios D1 e D2	Distúrbio D3	Simulação
Tempo de subida [s]	100,3841	0,2884	0,2884	71,5917
Tempo de estabilização [s]	178,6788	597,2345	597,4090	327,8542
Overshoot	0%	0,0135%	0,3151%	0,1379%
IAE	24,35	0,48	11,25	22,90

### 5.3.4 Comparação entre os controladores obtidos

Para verificar qual método gerou um controlador mais adequado ao processo compararam-se os parâmetros de resposta obtidos para a condição de simulação da câmara (mudança de *setpoint* e ação de todas as variáveis distúrbio). As respostas para a simulação encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Comparação entre a resposta obtida para a simulação nos diferentes controladores.

Parâmetros	Tentativa e Erro	Autotuning	Síntese direta
Tempo de subida [s]	26,3747	11,6947	71,5917
Tempo de estabilização [s]	159,3250	69,3175	327,8542
Overshoot	0,1200%	0,3879%	0,1379%
IAE	9,329	4,543	22,90

Após a análise das respostas frente a um degrau unitário no *setpoint* e no distúrbio, conclui-se que ambos os controladores possuem resposta satisfatória dentro das condições estabelecidas no problema, sendo que o controlador que possui o menor erro absoluto foi o parametrizado utilizando a ferramenta *Autotuning* que possui tempo de subida e estabilização menores que dos outros controladores e com um *overshoot pouco maior que os outros, entretanto ainda* dentro dos limites estabelecidos.

## 6 CONCLUSÃO

O modelo matemático construído para representar a variação da temperatura ambiente de uma câmara de fermentação com as dimensões 44,5m x 4,00m x 3,85m com isolamento térmico de poliuretano nas paredes se aproxima de câmaras de fermentação observadas na indústria. O modelo poderia ter um resultado pobre caso ocorresse redução na capacidade de vazão de ar do refrigerador, se tivesse incidência de radiação por proximidade de uma fonte de calor ou não houvesse isolamento nas paredes. Foi considerado uma aproximação para a transferência de calor que ocorre na esponja para determinar o seu calor de fermentação, que considera a condução instantânea dentro da esponja, sendo que, provavelmente, ela possui um comportamento mais próximo de um isolante térmico. Excluindo as aproximações que faz a condução dentro da esponja ser instantânea e a temperatura externa, temperatura do ar de refrigeração, umidade relativas e vazão de ar serem constantes, o modelo representa suficientemente bem e foi considerado adequado para o escopo do projeto realizado.

Avaliando as respostas obtidas para o modelo matemático, os controladores parametrizados pelo método tentativa e erro e *autotuning* apresentaram baixos valores para o tempo de subida, tempo de estabilização e percentual de *overshoot*. Pelo critério de avaliação, o controlador que mais se destacou foi o obtido pela ferramenta *Autotuning*. Comparando os parâmetros de desempenho dos três controladores verificou-se que o controlador parametrizado pelo *Autotuning* em comparação ao obtido pelo método tentativa erro possui menor IAE, com tempo de subida 55,7% mais rápido, com um tempo de estabilização 56,5% mais rápido, ainda com um percentual de *overshoot* aceitável (inferior a 10%). Utilizando a ferramenta foi possível alcançar mais facilmente o equilíbrio entre a velocidade de resposta e a robustez do controlador. Por esse motivo o controlador obtido pela ferramenta mostrou melhor desempenho que os obtidos por tentativa e erro e síntese direta.

No presente estudo foram realizadas algumas considerações e simplificações. Sendo assim ficam as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- aumentar o rigor do modelo incluindo um distúrbio na vazão de ar frio da câmara;
- criar uma modelagem para controle da umidade relativa do ar na câmara;
- refazer o experimento para medição do calor de fermentação para obter um resultado mais consistente;
- realizar a validação do modelo criado através da obtenção dos valores dos parâmetros utilizados em uma câmara de fermentação real;
- estudar como a temperatura da câmara interfere na variação da temperatura da esponja ao longo da fermentação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A indústria de biscoitos no Brasil. **M. Dias Branco**, 2020. Disponível em: <<https://ri.mdiasbranco.com.br/faq/a-industria-de-biscoitos-no-brasil/>>. Acesso em: 13 de set de 2021.

Anuário 2021. **Associação Brasileira das Indústrias de Biscoito (ABIMAPI)**. 2021. Disponível em: <[https://abimapi.com.br/cloud/ABIMAPI\\_Anuário\\_2021.pdf](https://abimapi.com.br/cloud/ABIMAPI_Anuário_2021.pdf)>. Acesso em: 13 de set de 2021.

ASHRAE. **Ashrae Handbook – Refrigeration, American Society of Heating, refrigerating and air conditioning engineers**. Atlanta: 2003

BAIK, O. D. et al. **Thermal and physical properties of bakery products. Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 41, n. 5, p. 321-352, 2001.

BERTOLINO, Marco. Túlio; BRAGA, Alexandre. **Ciência e tecnologia para a fabricação de biscoitos: handbook do biscoiteiro**. 1ª edição. São Paulo: Livraria Varela : Revista higiene Alimentar, 2017.

BRESNAHAN, D. **Elements, Modes, Techniques, and Design of Process Control for Thermal Processes**. Chapter 2. 2011.

CAMARGO INDUSTRIAL. **Carrinho para masseira**. Disponível em: <[https://www.camargoindustrial.com.br/maquina-usada/?e=Carrinho+para+masseira\\_762-774](https://www.camargoindustrial.com.br/maquina-usada/?e=Carrinho+para+masseira_762-774)>.

Acesso em: 20 de fev de 2022.

CARVALHO JÚNIOR, D. **Tecnologia de biscoitos, qualidade de farinhas e função de ingredientes**. Curitiba, Granotec do Brasil, 2005. Apostila.

CHECALC. **Chemical Engineering Calculations - Psychrometric Calculations**. Disponível em: <<https://www.checcalc.com/calc/wetBulb.html>>. Acesso em: 01 de dez de 2021.

COMISSÃO NACIONAL DE NORMAS E PADRÕES; **Compêndio de Resoluções da CNNPA**. Associação Brasileira das Indústrias de Alimentos – ABIA. São Paulo, 1999.

DAVIDSON, I. **Biscuit baking technology, processing and engineering manual**. 2ª edição, Elsevier. 2016

EL HALAL, S. L. M.; **Crackers, biscuits and cookies – processing and factors that affect quality parameters and consumer’s acceptability**. Lab Grãos. 2017.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 6a edição, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., R. J. 2007.

MANLEY, D.; **Technology of biscuits, crackers and cookies**. 4ª edição, England: Woodhead Publishing Limited, 2001.

MELO, M. E. P. de; **Otimização do processo de fabricação do biscoito tipo cracker**. Dissertação (Mestrado em Informática Aplicada) - Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2002.

MORETTO, E.; FETT, R.; **Processamento e análise de biscoitos**. 1ª edição, São Paulo, Livraria Varela, 1999.

OGATA, K.; **Modern Control Engineering**. 5ª edição, Prentice Hall, 2010.

OLIVEIRA, I. S.; ROCHA, R.; SOUZA, H. A.; **Sistema de controle de temperatura e umidade para um ambiente construído**. 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. Cusco. 2007.

PID Controller Tuning in Simulink. **MathWork**. 2021. Disponível em: <  
<https://www.mathworks.com/help/slcontrol/gs/automated-tuning-of-simulink-pid-controller-block.html>>.  
Acesso em: 16 de abr de 2022.

PIZZINATTO, A.; **Aspectos sobre a produção de biscoito “cracker”: Considerações sobre a matéria-prima e o processamento**. Bol. ITAL (Instituto de tecnologia de alimentos), Campinas, 16 (2): 165-189, abr./jun. 1979.

QUAGLIA, G.; **Ciencia y Tecnologia de La Panificacion**. 1ª edição, Acribia, 1999.

REGO, R. A; VIALTA, A.; MADI, L. F. C.; **Biscoitos industrializados: nutrição e indulgência na cultura alimentar**. 1ª edição. São Paulo: BB Editora. ABIMAPI, 2020.

SEBORG, D.E., EDGAR, T.F., MELLICHAMP, D.A., DOYLE, F.J. **Process Dynamics and Control**. Wiley, 2017.

## APÊNDICE 1 – CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO DO AR NO EXPERIMENTO DO CALOR DE FERMENTAÇÃO

O experimento foi realizado em um local onde não há circulação de ar, portanto o processo convectivo ocorre por convecção natural. Utilizando como base a 6ª edição do Incropera para esses cálculos, aplicando as propriedades do ar para 28,8 °C (temperatura média do experimento), obtidas por interpolação dos dados na Tabela A.4, na equação 9.12.

Propriedade do Ar à  $T=28,8^{\circ}\text{C} \cong 302\text{ K}$  (Incropera, 2007):

$$Pr = 0,70672 / \beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{306,55} = 3,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} / \nu = 16,09 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} / k = 26,67 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

A Equação A.1 (Incropera, 2007) foi utilizada para obter o número de Grashof onde  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\beta$  é o coeficiente de expansão do gás,  $T_s$  é a temperatura da superfície,  $T_{\infty}$  é a temperatura ambiente,  $\nu$  é a viscosidade cinemática e  $L$  é o comprimento característico que, neste caso, é a altura do carrinho de esponja. Foi utilizado  $T_s$  como a média da temperatura da esponja entre 7h e 12h, intervalo de dados onde a temperatura da esponja era maior que a temperatura ambiente.

$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty}) \cdot L^3}{\nu^2} \quad (\text{A. 1})$$

$$Gr_L = \frac{9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 3,26 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1} \cdot (304 - 302) \text{K} \cdot (0,7 \text{ m})^3}{\left(16,09 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)^2} = 8,31 \cdot 10^7 \quad (\text{A. 2})$$

Utilizando a equação A.3 foi determinado o número de Rayleigh ( $Ra_L$ ), onde  $Pr$  é o número de Prandtl.

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr = 8,31 \cdot 10^7 \cdot 0,70672 = 5,87 \cdot 10^7 \quad (\text{A. 3})$$

Como  $Ra_L$  é menor que  $10^9$  o escoamento é laminar (INCROPERA, 2007). Para esse tipo de escoamento a equação A.4 é a mais apropriada para determinar o número de Nusselt ( $Nu$ ) para uma placa plana vertical. É possível aproximar o cilindro vertical de uma placa plana utilizando a condição abaixo:

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr_L^{1/4}} \rightarrow 1,8857 \geq 0,366$$

$$Nu_L = 0,68 + \frac{0,67 \cdot (Gr_L)^{1/4}}{\left[1 + \left(0,492/Pr\right)^{9/16}\right]^{4/9}} = 45,67 \quad (\text{A. 4})$$

Por fim, utilizando a equação A.5, obtém-se o coeficiente convectivo ( $h$ ) :

$$Nu_L = \frac{h \cdot L}{k} \rightarrow h = Nu_L \cdot \frac{k}{L} = 45,67 \cdot \frac{26,67 \cdot 10^{-3}}{0,7 \text{ m}} = 1,74 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (\text{A. 5})$$

## APÊNDICE 2 – CÁLCULO DO CALOR ESPECÍFICO (CP) DA ESPONJA DE CREAM CRACKER

Como não existe na literatura o valor de calor específico ( $C_p$ ) para uma massa de biscoito cream cracker, foi feita uma aproximação para uma massa úmida de pão utilizando o modelo preditivo de Polak para sólidos em função da temperatura (equação A.6) e o modelo de Polak descrito para massa de pão úmida (equação A.7) em  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ :

$$cp_{\text{sólidos de massa de pão}} = 1,114 + 0,00486 \cdot T \quad (A.6)$$

$$cp_{\text{massa de pão}} = [(1 - x_{\text{água}}) \cdot cp_{\text{sólidos}} + x_{\text{água}} \cdot cp_{\text{água}}] \quad (A.7)$$

Substituindo a temperatura média do experimento ( $T=31,2^\circ C$ ), a fração de água do experimento ( $x_{\text{água}} = 0,29$ ) e o calor específico da água na temperatura média ( $cp_{\text{água}} = 4178 J/kg \cdot ^\circ C$ ) nas equações A.6 e A.7 obtêm-se os seguintes valores:

$$cp_{\text{sólidos de massa de pão}} = 1,265632 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$cp_{\text{massa de pão}} = 1212,52 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} = 1212,52 \frac{J}{kg \cdot K}$$

### APÊNDICE 3 – CÁLCULO DA TAXA DE CALOR DEVIDO A ABERTURA DAS PORTAS DA CÂMARA ( $\dot{Q}_{porta}$ )

Para obter a taxa de calor que câmara recebe nos momentos de abertura da porta da câmara de fermentação para entrada ou saída de esponjas utilizou-se as recomendações de ASHRAE (2003), conforme a equação A.8 na qual  $q$  é carga térmica sensível e latente (em kW),  $D_t$  é a fração de tempo de abertura das portas (adimensional),  $D_f$  é o fator de fluxo da porta (adimensional) e  $E$  é a efetividade do sistema de proteção da porta (adimensional).

$$\dot{Q}_{porta} = q \times D_t \times D_f \times (1 - E) \quad (A.8)$$

A carga térmica sensível e latente do ar ( $q$ ) é estimada a partir de propriedades de ar úmido conforme a equação A.9 onde  $A$  é a área da porta (em m<sup>2</sup>),  $h_i$  é a entalpia do ar de infiltração (em kJ/kg),  $h_r$  é a entalpia do ar refrigerado (em kJ/kg),  $\rho_i$  é massa específica do ar de infiltração (em kg/m<sup>3</sup>),  $\rho_r$  é massa específica do ar refrigerado (em kg/m<sup>3</sup>),  $g$  é a aceleração da gravidade (em m/s<sup>2</sup>),  $H$  é altura da porta (em m) e  $F_m$  é o fator de densidade (equação A.10):

$$q = 0,221 \times A \times (h_i - h_r) \times \rho_r \times \left(1 - \frac{\rho_i}{\rho_r}\right)^{0,5} \times (g \times H)^{0,5} \times F_m \quad (A.9)$$

$$F_m = \left[ \frac{2}{1 + \left(\frac{\rho_i}{\rho_r}\right)^{1/3}} \right]^{1,5} \quad (A.10)$$

Assumindo que o ar infiltrado possui temperatura de bulbo seco de 35°C e umidade relativa de 78% (pior cenário: dia quente e seco) e que o ar no interior da câmara possui temperatura de bulbo seco de 28°C e umidade relativa de 80%, é possível obter a entalpia do ar através de carta psicométrica. Foi utilizado o software Checalc para obter os valores de entalpia abaixo:

$$h_{infiltração} = h_i = 123,85 \frac{KJ}{kg} \quad e \quad \rho_i = 0,8936 \frac{kg}{m^3}$$

$$h_{câmara} = h_r = 87,92 \frac{KJ}{kg} \quad e \quad \rho_r = 0,9301 \frac{kg}{m^3}$$

Utilizando os valores de massa específica na equação A.10 teremos que  $F_m$  é 1,01. A porta da câmara possui 2,2m de largura por 2,5m de altura. Aplicando  $H = 2,5m$ ,  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$  e  $A = 5,5 \text{ m}^2$  na equação A.9, obteremos que o calor sensível e latente  $q = 4,0244 \text{ kJ/s}$ .

Pela metodologia descrita em ASHRAE (2003), o parâmetro DT é estimado pela equação A.11 onde  $P$  é número de passagens pela porta,  $\theta_p$  é tempo de abertura e fechamento (em s),  $\theta_o$  é o tempo que a porta permanece aberta (em s) e  $\theta_d$  é o tempo de referência (24 horas).

$$D_t = \frac{P \times (\theta_p + \theta_o)}{3600 \times \theta_d} \quad (A.11)$$

Como tenho 60 carrinhos que precisam fermentar por 12 horas em 24 horas teremos  $P = 180$  com  $\theta_p = 6$  s (3 s subindo e 3 s descendo),  $\theta_o = 5$  s e  $\theta_d = 24$ h, logo  $D_t = 0,02292$ .

Acerca do fator de fluxo da porta  $D_f$ , trata-se de uma relação entre a troca de ar real e a troca de fluxo completamente desenvolvido. Quando o fluxo é completamente desenvolvido, isto é, a abertura da porta deve-se para o exterior ou algum outro ambiente,  $D_f = 1$ . Em condições normais, tal valor varia entre 0,7 e 0,8. Para o caso da câmara de fermentação, a câmara fria terá a abertura da porta direcionada para o ambiente interno sem havendo um fluxo intenso. Assim, adota-se  $D_f$  de 0,80.

Sobre o sistema de proteção da porta, a câmara será projetada com um sistema de cortina de ar vertical. Calcula-se a efetividade  $E$  dos dispositivos de proteção da porta. Para portas sem nenhuma proteção, que não é o caso,  $E = 0$ . Para portas com diferentes dispositivos de proteção segue na Tabela 7 os valores correspondentes da efetividade. Desta forma  $E = 0,79$ .

Tabela 10 - Efetividade dos dispositivos de proteção de porta da câmara fria

<b>Dispositivo</b>	<b>Efetividade E</b>
Cortina de ar vertical	0,79
Cortina de ar horizontal	0,76
Cortina de tiras de plástico	0,93
Cortina de ar + cortina de plástico	0,91

Substituindo os parâmetros na equação A.8, teremos que o calor de renovação de ar ao abrir a porta da câmara será :

$$\dot{Q}_{porta} = 4,0244 \text{ kW} \times 0,02292 \times 0,8 \times (1 - 0,79) = 0,0155 \text{ kW} = 155 \text{ W}$$