UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

LUCAS DAS NEVES MATHEUS

SINTONIA DE UM CONTROLADOR PID PARA SISTEMA DE AQUECIMENTO EM BATELADA DE UM MINI-TANQUE DE UMA MICROCERVEJARIA

Tubarão

2019

UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

LUCAS DAS NEVES MATHEUS

SINTONIA DE UM CONTROLADOR PID PARA SISTEMA DE AQUECIMENTO EM BATELADA DE UM MINI-TANQUE DE UMA MICROCERVEJARIA

Relatório Técnico/Científico apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Prof. Dr. Marcos Marcelino Mazzucco (Orientador)

Tubarão

2019

LUCAS DAS NEVES MATHEUS

SINTONIA DE UM CONTROLADOR PID PARA SISTEMA DE AQUECIMENTO EM BATELADA DE UM MINI-TANQUE DE UMA MICROCERVEJARIA

Este relatório técnico/científico foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química e aprovado enn sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Química da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão, 27 de novembro de 2019.

Prof. Dr. Marcos Marcelino Mazzueco (Orientador)
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Msc.Diogo Quirino Buss (Avaliador)
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. MSc. João Michels Carcloso (Avaliador)
Universidade do Sul de Santa Catarina

Dedico esse trabalho a toda a minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos, direta e indiretamente envolvidos na resolução desse trabalho.

“Fortune favors the bold”

RESUMO

O presente relatório, apresentado como pré-requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Químico, junto ao curso de Engenharia Química na Universidade do Sul de Santa descreve o processo de sintonia de um controlador PID em um mini-tanque de receitas em batelada para uma cervejaria artesanal, onde se executa o controle de temperatura durante o aquecimento do mosto. Para tal, a metodologia se dividiu entre simulação de controle PID, usando o software Matlab® e obtenção de dados empíricos, testados no sistema, com objetivo de aferir os resultados encontrados pela simulação. Através de um teste de *bump*, foram coletados os dados do comportamento do processo em malha aberta, que posteriormente, foram aplicados para se extrair a função de transferência do sistema. Com a função devidamente conhecida, o aplicativo PID Tuner® foi empregado para simular diferentes parâmetros para o controlador PID, sendo então analisadas configurações, controle *on-off*, somente com controle proporcional, controle PD e controle PID, onde o controle PD, demonstrou ser o mais adequado ao controle de temperatura, condição da natureza integrativa do sistema abordado pela pesquisa.
Palavras-chave: Sintonia; PID; Controle.

ABSTRACT

This document, a partial requirement to obtain the Chemical's Engineer degree at Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL), describes the tuning process of a PID control applied to a batch tank, which is used as receipt tester in a microbrewery, where temperature must be controlled during the heat phase of the beer wort. The metodology consisted of PID control simulation using Matlab® and empyrical data analysis, extracted from the real process, which served as a way to verify the simulation results. The system transfer function was obtained through a bump test. In the next step, PID Tuner ® simulated a variety of parameters of PID controller, where on-off control, proportional control only, PD control and PID control had been tested. From the four, the Proporcionl-derivative control was the most adequate to temperature control due to the integrator nature of the system, which was the main objective of this research.
Keywords: Tuning ; PID ; Control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-Resposta em malha aberta de um sistema integrador 19
Figura 2- Modelo de controlador industrial Novus-1100 20
Figura 3- Modelo de resposta de uma ação on-off 21
Figura 4- Resposta típica de um controlador proporcional a uma perturbação degrau 23
Figura 5-Diferentes curvas de resposta para diferentes valores de Ki 24
Figura 6-"Titã"- mini-tanque de receitas 29
Figura 7- Interior do titã 29

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Curva de controle o processo em modo *on-off* 32
Gráfico 2-Dados de entrada-saída do sistema de trabalho 34
Gráfico 3-Função de transferência do processo em comparação com a resposta em malha aberta 35
Gráfico 4-Resposta simulada de uma perturbação degrau ao sistema controlado por um controlador puramente proporcional 36
Gráfico 5-Curva de controle do processo controlado pelo controle puramente proporcional . 37
Gráfico 6-Resposta simulada de uma perturbação degrau ao sistema controlado por um controlador proporcional-derivativo 38
Gráfico 7- Curva de controle do processo controlado por um controlador proporcional-derivativo 39
Gráfico 8- Resposta simulada de uma perturbação degrau ao sistema controlado por um controlador proporcional-integral-derivativo 40
Gráfico 9-Curva de controle do processo controlado por um controlador PID 41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA 11
1.2 HIPÓTESES PARCIAIS 12
1.3 OBJETIVOS 13
1.3.1 Objetivo Geral 13
1.4 RELEVÂNCIA PARA A SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL, PARA A CIÊNCIA E SOCIEDADE 14
2 REFERENCIAL TEÓRICO 15
2.1 A PRODUÇÃO CERVEJEIRA NO BRASIL 15
2.1.1 Formulação de novos produtos 16
2.2 CONTROLE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS 16
2.2.1 Controle feedback 17
2.2.2 Modelagem de processos 17
2.2.3 Controladores industriais 19
2.2.4 Sintonia PID 26
3 MATERIAIS E MÉTODOS 27
3.1 O ESTUDO REALIZADO 27
3.2 VARIÁVEIS 27
3.3 SISTEMA DE TRABALHO 28
3.4 CRITÉRIOS DE CONTROLE 30
3.5 CRONOLOGIA DE ETAPAS 30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 32
4.1 CONTROLADOR *ON-OFF* 32
4.2 OBTENÇÃO DO MODELO DO SISTEMA 33
4.3 CONTROLE PROPORCIONAL 36
4.4 CONTROLE PROPORCIONAL-DERIVATIVO 38
4.5 CONTROLE PID 40
5 CONCLUSÃO 42
6 REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 43

1 INTRODUÇÃO

O emprego de controladores em processos industriais é prática comum na indústria atualmente. No entanto, cabe salientar que sua configuração, ou comumente chamada de sintonia, é uma tarefa desafiadora e responsável por boa parte dos problemas de controle. E esses problemas não se aplicam somente às grandes empresas, mas também a pequenas empresas que necessitam de um controle mais fino, ou preciso, em processos específicos.

Esse é o caso dos processos na indústria alimentícia, e mais especificamente, na indústria cervejaria, que viu grande avanço recentemente com a entrada de um enorme volume de micro cervejarias no mercado. Apesar de menores em robustez, essas pequenas cervejarias precisam garantir o controle de qualidade de seus produtos, e utilizam controladores para regular rampas de aquecimento durante a produção.

Os controladores PID possuem boa robustez e capacidade para serem aplicados nesse tipo de situação, no entanto, sua sintonia pode variar significativamente a depender do equipamento/método de produção empregado. Portanto, processos contínuos (usados em grandes empresas) se diferem muito de processos batelada (usados em pequenas empresas) quanto a estratégia de sintonia.

O presente trabalho descreverá a solução da sintonia de um controlador PID utilizado em uma micro cervejaria, para aquecimento em batelada do mosto em mini-tanque para testes de receita, aplicando a simulação de controle de processos e testes empíricos como principais recursos para isso.

1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA

Diversos ramos industriais se modernizaram através do emprego de técnicas e equipamentos que otimizam a qualidade e o ganho de tempo nos processos industriais. É notório o grande salto em tecnologia que ocorre em todos os setores de produção, incluindo indústrias de matéria-prima, embalagens, equipamentos e até mesmo alimentos.

A evolução tecnológica revolucionou a forma de criação de novos produtos no mercado. Não somente a qualidade tem sido uma característica relevante, mas também a capacidade de produção em larga escala de forma rápida e prática, evitando erros e desempenho inadequado de operadores ao executar tarefas rotineiras e de caráter regulador (controle).

É nesse cenário que a automação industrial e o controle dos processos têm ganhado muita importância, como uma forma de reduzir o número de erros durante a produção e também garantir que a demanda será suprida, uma vez que um sistema de controle automatizado bem dimensionado e alinhado com os objetivos específicos de cada ramo, permite um salto na eficiência dos processos quando comparado ao controle manual.

Como mencionado, todos os setores da indústria podem se utilizar da instrumentação e controle para alavancar seu negócio, inclusive o setor das cervejarias artesanais ou micro cervejarias. Um importante aspecto presente nessa área é a pesquisa e criação de novas receitas de cerveja. Para tal, um pequeno tanque pode ser utilizado como forma de testá-las em pequena escala, simulando nele todas as condições da operação real de produção da cerveja.

É nesse contexto que se situa o nosso problema de pesquisa: **qual o método de controle automatizado, dentre os modos; *on-off*, proporcional, PD e PID, será o mais eficiente para controlar rampas de temperatura de um tanque para receitas de uma microcervejaria. Em estudo realizado no ano de 2019 na cidade de Tubarão, sul catarinense.**

1.2 HIPÓTESES PARCIAIS

a) O modo de controle *on-off* será o mais eficiente no controle do processo.
b) O modo de controle proporcional (ganho) será o mais eficiente no controle do processo.
c) O modo de controle PD será o mais eficiente no controle do processo.
d) O modo de controle PID será o mais eficiente no controle do processo.
e) O processo exige um sistema mais robusto de controle.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar diferentes sintonias e estratégias de controle utilizando um controlador PID automático, a fim de selecionar a sintonia que estabilizará o processo dentro de critérios definidos.

.

1.3.1.1 Objetivos Específicos

a) Elaborar uma carta de controle do processo sendo regulado pelo método *on-off*;
b) Realizar um teste de perturbação degrau em malha aberta no sistema;
c) Determinar a função de transferência que rege o processo;
d) Analisar a sintonia ideal para um sistema de controle por ganho simples (proporcional);
e) Elaborar uma carta de controle do processo regulado pelo método de ganho simples;
f) Analisar a sintonia ideal para um sistema de controle PD (proporcional e derivativo);
g) Elaborar uma carta de controle do processo regulado pelo método de controle proporcional-derivativo
h) Analisar a sintonia ideal para um sistema de controle PID (proporcional, integral e derivativo);
i) Definir, de forma qualitativa, qual sintonia será a melhor para o controle do processo;

1.4 RELEVÂNCIA PARA A SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL, PARA A CIÊNCIA E SOCIEDADE

A busca de formas alternativas para aumentar a eficiência de sistemas e processos conduz, neste caso especificamente, para melhor aproveitamento da energia dispensada na produção. Esse fato descreve a importância do estudo para o meio ambiente, considerando-se a produção de energia como uma forma tradicional que interfere diretamente na natureza. E, em contribuindo para com a sustentabilidade, é caracterizada a importância para a sociedade, atualmente preocupada com a proteção ao vilipendiado planeta terra.

A pesquisa quer, também, encontrar novas possibilidades para a otimização e racionalização do processo de produção de cervejas a partir de micro cervejarias. Os resultados, após publicação, poderão ser utilizados por outras empresas e, também, oferecer subsídios para discussões acadêmicas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A PRODUÇÃO CERVEJEIRA NO BRASIL

A cerveja pode ser considerada um dos alimentos mais tradicionais e importantes para a humanidade. Esse tipo de bebida existiu de diferentes maneiras ao longo da história, perpetuando-se em várias culturas e sociedades por todo o mundo. Apresentando características diversas, essa bebida alcoólica possui inúmeras receitas e modos de preparo, sendo produzida tanto artesanalmente quanto de forma industrial.

"A produção de cerveja no Brasil apresenta uma tendência crescente nos últimos 30 anos, como mostra o gráfico abaixo, e recentemente alcançou o patamar de 140 milhões de hectolitros (mi hl) colocando o Brasil em terceiro lugar no ranking mundial atrás apenas da líder China (460 mi hl) e dos EUA (221 mi hl) e a frente da Alemanha (95 mi hl) e da Rússia (78 mi hl) . (BRASIL, 2017)

É em meio a esse mercado que se proliferam no Brasil as microcervejarias, ou cervejarias artesanais. Focadas em um processo mais voltado para qualidade e capacidade de diferenciação de produtos, esse novo nicho traz consigo desafios técnicos e possibilidades no ramo cervejeiro.

> Dados divulgados pelo **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)** apontam um crescimento de 37,7% no número de cervejarias registradas no Brasil em 2017 – 2016 terminou com 493, já 2017 encerrou com 679. Outra informação interessante: 8,9 mil produtos foram registrados por estes negócios em 2017. Uma média de 13 para cada marca. (ABRACERVA, 2018 – grifo do autor).

Nas palavras do presidente da ABRACERVA (associação brasileira de cerveja artesanal), Carlos Lopoli (ABRACERVA, 2018):

"As cervejarias artesanais e independentes, que não têm relação com grupos econômicos internacionais, estão conscientizando o consumidor sobre a degustação da bebida, além de contribuírem para a cultura gastronômica local".

É nesse contexto que surgem novos desafios, não só no âmbito de lançamento de novos tipos de cerveja, mas também na engenharia envolvida na manutenção dos altos parâmetros de qualidade que são exigidos pelos consumidores.

2.1.1 Formulação de novos produtos

A criação e inovação no setor cervejeiro se dá através do lançamento de receitas que variam os componentes presentes no alimento. Desse modo, o teste em pequena escala é algo comum quando se busca lançar um novo produto. Pequenos tanques podem ser usados para simular as etapas do processo produtivo e realizar o teste efetivo da eficiência de uma nova formulação.

Para se alcançar esse objetivo, é necessário que se respeite as condições de processo típicas da produção cervejeira. Portanto, a utilização de controladores automatizados é essencial para que mantenha a variável temperatura sob o mais fino controle, sob risco de afetar a qualidade do produto.

2.2 CONTROLE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

As técnicas de controle estão espalhadas por toda indústria. A arte de manter um fenômeno ou processo dentro de uma zona específica de variação é uma característica marcante da automação tão evidente no setor industrial atualmente. Os métodos de controle permitem que a maioria dos processos industriais sejam regulados de uma forma relativamente “simples”.

“O controle automático aplicado às indústrias de processos é intitulado, simplesmente, controle de processos. Controlar um processo é fazer com que suas variáveis interajam de modo ordenado, mantendo-as o mais próximo possível de valores considerados ideais, diuturnamente.” (GARCIA, 2017, p. 23). Como descrito pelo autor, o objetivo de controle é aproximar a realidade a um cenário ideal. É importante salientar que todo processo de controle irá gerar erros e desvios, pelos mais variados motivos, como ruídos de sinais e interferências da própria natureza do fenômeno a ser controlado.

Portanto, descobrir o como e o quando se modificar uma variável a fim de obter-se a resposta desejada é o cerne de todo problema de controle. (*id ibid.*, 2017).

Para tal fim, a ciência do controle de processo irá unir diversas áreas do conhecimento e precisa se adaptar para cada problema, haja visto a grande variedade de processos existentes na indústria.

“A engenharia de controle depende e compartilha ferramentas da física (modelagem e dinâmicas), ciências da computação (informação e softwares) e pesquisas operacionais

(otimização, teoria de probabilidade e teoria do jogo), mas também se difere desses temas tanto em *insights* e abordagens.” (ÀSTROM, 2009, p. 5 – nossa tradução).

2.2.1 Controle feedback

O modo de controle *feedback* é o mais aplicado na indústria, haja visto seu princípio de funcionamento e resultados alcançados. Basicamente, um controle feedback se baseia na leitura de uma variável, que será comparada a meta estabelecida, para então definir a dimensão da ação de controle a ser executada.

> O intuito de qualquer forma de controle de processos é manter a **variável controlada** no **valor de referência**, **valor desejado** ou ***set point*** em meio a **distúrbios** ou **perturbações** existentes. A regulação via realimentação é conseguida medindo-se a variável controlada c e agindo-se em outra variável de processo, a qual pode ser manipulada, intitulada **variável manipulada** m, com uma intensidade que é função do valor do desvio e entre o valor desejado e a variável controlada (e=r-c). (GARCIA, 2017, p. 44 – grifo do autor).

Como descrito por Garcia, o controle *feedback* permite um ganho de precisão e abre um grande leque de possibilidades, já que o desvio (ou erro) pode ser utilizado para dosar a ação de controle, permitindo respostas mais precisas, ou mais rápidas, a depender da necessidade do problema. Para sistemas de controle de temperatura, de vital importância para a indústria cervejeira, o controle *feedback* é mais do que necessário, visto que toda ação do controlador será baseada na temperatura medida no interior dos tanques.

Para se determinar qual o comportamento do processo, e descobrir qual deve ser a resposta do controlador ao desvio, por exemplo, da temperatura do tanque e a temperatura objetivo (*set point*), é necessário que se entenda, através da modelagem matemática, como isso ocorre.

2.2.2 Modelagem de processos

Existem basicamente dois caminhos para analisar e montar um sistema de controle. A abordagem analítica, quando o modelo matemático do sistema é conhecido, e uma abordagem mais empírica, quando isso não é possível.

> No estudo de sistemas de controle, o leitor deve ser capaz de modelar sistemas dinâmicos em termos matemáticos e analisar suas características dinâmicas. O modelo matemático de um sistema dinâmico é definido como um conjunto de equações que representa a dinâmica do sistema com precisão ou, pelo menos, razoavelmente bem.

> Note que um modelo matemático não é único para determinado sistema. Um sistema pode ser representado de muitas maneiras diferentes e, portanto, pode ter vários modelos matemáticos, dependendo da perspectiva a ser considerada. (OGATA,2010, p.11).

Como elencado, o escopo de projeto e a precisão requisitada para cada processo definirá o quão complexo o modelo deverá ser. De modo geral, um sistema mais complexo, ou mais próximo da realidade, irá também aumentar a complexidade do sistema de controle. Portanto, é importante se analisar o quão robusto será o esquema de controle para cada situação.

> Na obtenção de um modelo matemático, devemos estabelecer uma conciliação entre a simplicidade do modelo e a precisão dos resultados da análise. Na obtenção de um modelo matemático relativamente simplificado, frequentemente torna-se necessário ignorar certas propriedades físicas inerentes ao sistema. Em particular, se for desejável um modelo matemático linear de parâmetros concentrados (isto é, se quisermos empregar equações diferenciais ordinárias), é sempre necessário ignorar certas não linearidades e os parâmetros distribuídos que podem estar presentes no sistema físico. Se os efeitos que essas propriedades ignoradas têm sobre a resposta forem pequenos, pode-se obter boa aproximação entre os resultados da análise de um modelo matemático e os resultados do estudo experimental do sistema físico. (*id ibid.*, 2010)

Portanto, fica nítida que no ajuste fino de um controlador, é importante que se alie o modelo matemático (quando a construção desse for possível) e as respostas encontradas na prática, através de testes no mundo real (quando o sistema permitir testes sem causar problemas).

A modelagem matemática se baseia em diversas leis e modelos estipulados pelos mais diversos ramos científicos. Isso significa que, na maioria das aplicações práticas, os modelos são utilizados para se determinar a função de transferência do processo.

"A função de transferência é uma ferramenta simples e útil para representar a relação entre as entradas do processo e suas saídas. A representação no domínio de Laplace é necessária para simular as dinâmicas de determinada função de transferência." (SUNG, LEE, 2009, p. 32).

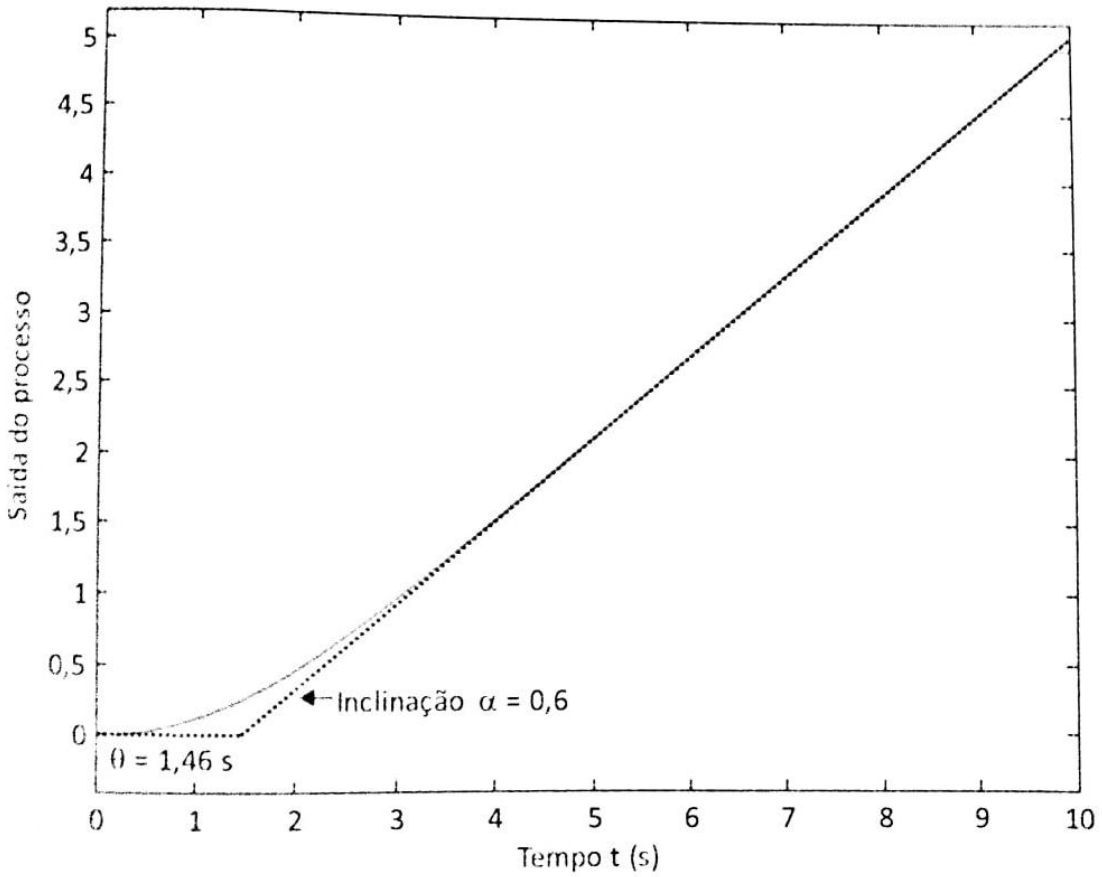
"A função de transferência é uma propriedade inerente ao sistema, independentemente da magnitude e da natureza da função de entrada ou de excitação." (OGATA, 2010, p.11).

De modo simples, o modelo matemático, após ser determinado, deve ser traduzido para uma função de transferência, típica de cada processo, onde, no domínio de Laplace, seu comportamento e eficácia no controle poderá ser observado, sendo essa utilizada como base para a definição do melhor controlador e estratégia de controle a ser empregada.

Os modelos também definem quais comportamentos devem ser esperados na resposta do sistema. Em sistemas específicos, geralmente quando somente para aquecimento, o

comportamento é dito como integrador, o que significa que o sistema acumula toda ação de controle. Uma representação típica de processo integrador é a que segue:

Figura 1-Resposta em malha aberta de um sistema integrador



Fonte: Garcia, (2017, p. 155)

É evidente que esse tipo de sistema não se autorregula, e portanto, essa característica deve ser apreciada durante a sintonia de um controlador para esse tipo de situação.

2.2.3 Controladores industriais

A peça principal em sistemas de controle é o controlador automático. A função do controlador é executar de forma automatizada as ações de correção que mantenham o processo dentro de um estado estável e controlado. Um controlador industrial deve ser capaz de usar as informações fornecidas pelos sensores para calcular qual a melhor ação a ser tomada para estabilizar determinada situação que não seja a ideal para pleno funcionamento processual.

"Um controlador automático compara o valor real de saída da planta com a entrada de referência (valor desejado), determina o desvio e produz um sinal de controle que reduzirá

o desvio a zero ou a um valor pequeno. A maneira pela qual o controlador automático produz o sinal de controle é chamada ação de controle.” (OGATA, 2010, p.18).

O sinal de controle é a única variável que o controlador realmente manipula, e o quanto esse sinal se estende, ou possui de capacidade, está intimamente ligado ao processo industrial em questão. Isso significa que um controlador PID, ou suas variantes (P, PI, PD, dentre outras combinações), pode administrar uma ação de controle dimensionada de modo a gerar a resposta esperada, que estabiliza o sistema em torno de um valor pré-definido (*set point*). Diferentes controladores podem ser aplicados em diferentes áreas, assim como um único modelo de controlador comercial pode suprir funções relativamente diferentes em setores variados da indústria.

Figura 2- Modelo de controlador industrial Novus-1100

Fonte: Novus, (2012).

A figura 2 demonstra um controlador industrial. Compacto e com interface simples, podem ser empregados em diversas áreas da indústria. O adesivo lateral apresenta um guia das entradas e saídas do controlador, bem como suas especificações e orientações básicas. O painel frontal apresenta o *set point* e a medição da variável e processo, além dos botões que permitem a configuração direto na máquina. A configuração via USB também é uma opção, onde o software do fabricante apresenta uma interface clara com os parâmetros ajustáveis e sua função. Esse modelo permite as variadas configurações PID, como *on-off*, PI, PD e PID.

2.2.3.1 Modo de controle *ON-OFF*

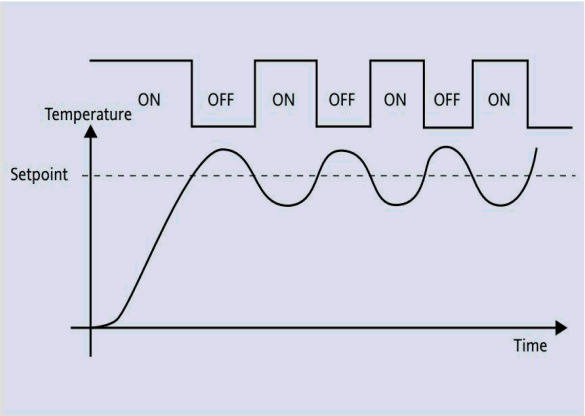
Muito utilizado em aplicações específicas e que não exigem muita precisão, o controle *on-off* é a maneira mais simples de se controlar um processo. Basicamente, a ação de controle é executada a 100% de capacidade sempre que a variável do processo não corresponde ao *set point*, e desliga a ação quando ela ultrapassa o *set point*.

"O modo mais simples de controle não linear é o controle *on-off*, liga/desliga, de duas posições ou *bang-bang*. Neste caso, a saída do controlador (variável manipulada) pode assumir apenas dois estados: ligado/desligado, aberto/fechado, 0/1 etc., e muda toda vez que a variável controlada cruza o valor desejado." (GARCIA, 2017, p. 305).

Como descrito pelo autor, a variável de saída só pode assumir dois estados. Desse modo, esse tipo de controle não é o mais indicado para aplicações que busquem a maior precisão possível, visto que qualquer erro (diferença entre a variável lida do processo e o *set point*) irá gerar uma resposta com 100% de intensidade.

Esse tipo de situação acontece nos aparelhos de ar-condicionado residenciais. Sempre que a temperatura do ambiente não é a mesma da desejada pelo usuário, o sistema de controle ativa o compressor e realiza o ciclo de refrigeração, ligando o aparelho. Quando a temperatura é atingida, o sistema se desliga até que as temperaturas lidas e desejada sejam novamente diferentes.

Figura 3- Modelo de resposta de uma ação on-off



Fonte: Citysystem, (2016).

A figura 1 representa o comportamento no controle *on-off*. O gráfico demonstra como o valor controlado, nesse caso a temperatura, flutua ao longo do *set-point*. Isso ocorre, como exemplificado pela figura, por causa da ação de liga-desliga, que hora produz uma ação

exagerada(liga), que ultrapassa o *set-point*, e hora se mantém desligado, anulando o controle totalmente e fazendo a variável descer abaixo do *set-point*.

2.2.3.2 Controlador PID

O modo de controle mais conhecido e aplicado a indústria é utilizando o controlador PID. Baseado em três constantes ou parâmetros, proporcional, integral e derivativo, que podem ser utilizados individualmente ou em conjunto, conseguem resolver a maioria dos problemas de controle industriais, além de ser o modo de controle mais empregado em controladores comerciais.

> Apesar da contínua busca de novas técnicas de controle, com o uso de tecnologia digital de ponta, não há dúvida que, em processos industrias, o algoritmo de controle mais usado continua sendo o PID (proporcional, integral, derivativo). Isso se deve à sua fácil implementação, aliada à sua versatilidade, significando que os resultados obtidos são satisfatórios, mesmo com variações apreciáveis nas características do processo e nos distúrbios. (GARCIA, 2017, p. 322).

A versatilidade do controle PID é sem dúvida sua melhor característica. Para se dimensionar um sistema PID, primeiro é necessário compreender como cada parâmetro influencia a ação de controle. É válido ressaltar que um controlador pode ter somente um ou dois parâmetros atuantes, gerando versões mais simples do controle PID.

2.2.3.2.1.1 Controle proporcional

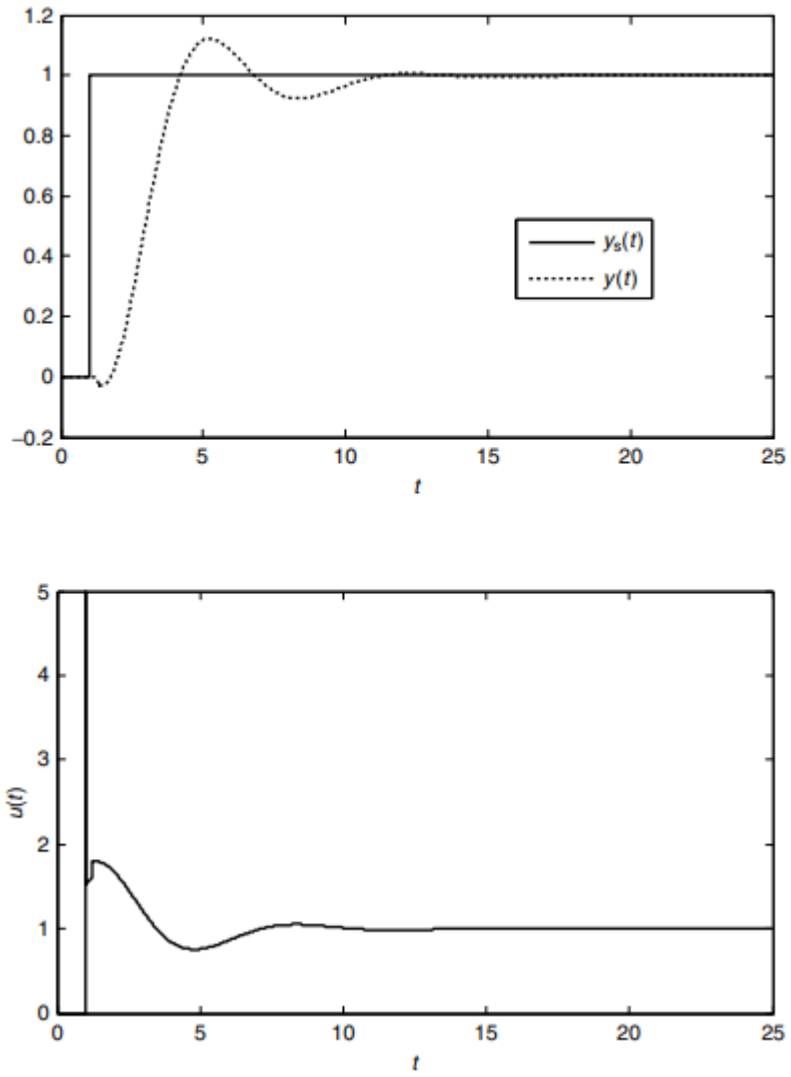
O controle proporcional, representado pelo parâmetro P, corresponde a uma resposta do sistema em função do erro apresentado. Isso significa que o controlador irá responder em função da distância entre PV (variável do processo) e o SP (*set point*), quanto maior o Kp (ou ganho proporcional) do sistema, mais bruscamente o sistema responde. A resposta proporcional pode ser entendida, de forma análoga, a resposta humana a superfícies superaquecidas, quanto mais quente está uma superfície em que tocamos, mas lançamos nossa mão para longe dela, em grande velocidade, quanto mais amena a temperatura, mais devagar executamos o movimento.

Segundo Garcia (2017, p.233), o ganho proporcional pode ser definido como:

$Kc = \frac{\Delta S}{\Delta E}$, onde o ganho nada mais é do que uma relação entre a variação da resposta do processo a uma variação na entrada (ou ação de controle).

"A saída de controle u(t) da parte proporcional é proporcional ao erro $y_s(y)$ como será demonstrado na figura 3. Isso significa que a parte proporcional exerce a função de empurrar a saída do processo em função do erro." (SUNG, LEE, 2009, p.122 – nossa tradução).

Figura 4- Resposta típica de um controlador proporcional a uma perturbação degrau



Fonte: Sung e Lee, (2009, p. 122).

A figura 2 demonstra, no primeiro gráfico, a resposta de controle a uma perturbação degrau no sistema, e logo abaixo, encontra-se a variação na saída de controle, ou seja, quanto de ação o controlador está aplicando. No controle proporcional, a depender de sua sintonia, o controlador irá responder em função da distância entre a variável medida e o valor do *set point*.

Como apresentado pelo autor, a curva gerada ao redor do *set point* é oscilação característica do processo proporcional. A figura 3 também ilustra que a ação gera um resultado acima do *set point*, que depois será estabilizado. Em sistemas em que se exija o mínimo possível de *overshoot* (subida além do *set point*), o controle proporcional sozinho pode não ser o suficiente.

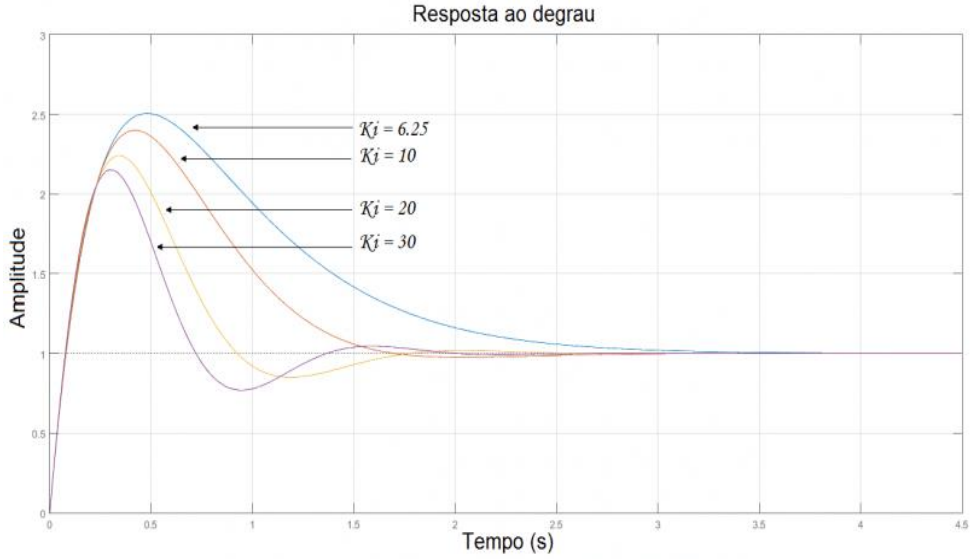
2.2.3.2.1.2 Controle Integrativo

O controle integrativo é o segundo parâmetro utilizado no sistema PID. Esse tipo de controle interage com o erro de uma forma diferente ao proporcional. O modo integrativo responde ao valor integral do erro, ou seja, responde de forma mais rápida e precisa do que o controle proporcional, que atua somente no valor do erro.

"A ação integral é proporcional a integral do erro de controle, onde Ki é tido como o ganho integral. Desse modo, a ação integral está relacionada ao passado do erro de controle." (VISIOLI, 2006, p. 5 – nossa tradução).

Como elencado pelo autor, o parâmetro integrativo "analisa" o erro que aconteceu, e com base nele potencializa a saída de controle. Isso permite que o sistema responda mais rápido a uma variação o set-point, e por isso, os sistemas que unificam proporcional e integrativo (PI), são capazes de resolver a maioria dos problemas industriais.

Figura 5-Diferentes curvas de resposta para diferentes valores de Ki



Fonte: Madeira, (2016).

A figura 5 demonstra como o aumento do parâmetro integrativo acelera a resposta do sistema, fazendo-o atingir o *set point* mais rapidamente. No entanto, se ressalta a característica negativa desse tipo de situação, que é a oscilação mais agressiva antes da estabilização. Em sistemas que não suportem ou não permitem muitas oscilações, é necessário que se diminua o ganho integral a fim de se obter uma resposta menos oscilatória.

2.2.3.2.1.3 Controle derivativo

O controle derivativo é o último parâmetro a ser considerado na sintonia do controlador PID. Sua função é analisar a variação do erro integrativo, e então, controlar a ação para que se diminua o tempo de estabilização da resposta de controle. Analogamente, é como se o controlador verificasse que a variação do erro está diminuindo, portanto, sinalize que a ação de controle por também ser diminuída.

> O propósito da ação derivativa é melhorar a estabilidade em malha fechada. O mecanismo de instabilidade pode ser entendido intuitivamente. Por causa das dinâmicas de processo, leva algum tempo até que uma mudança na variável de processo seja notada na saída. Portanto, o sistema de controle irá se atrasar na correção do erro. A ação do controlador com ganho proporcional e derivativo pode ser interpretada como se o controle fosse proporcional para a saída esperada, onde a predição é feita se extrapolando o erro pela tangente do erro da curva.(ASTROM, 1995, p.69 – nossa tradução).

Como sumarizado por Astrom, a tangente do erro da curva nada mais é que a derivada do erro, ou sua taxa de variação. Um controlador que se utilize de ganho derivativo irá usar essa variação para “prever” um erro futuro, e dessa forma amenizar a ação de controle. Como o modo de controle derivativo atua em função de uma variação, é válido ressaltar:

“A ação derivativa nunca é usada sozinha, pois, para um erro constante, a saída do controlador seria nula. Ela sempre é usada com ações P ou PI.” (GARCIA, 2017, p. 371).

Ou seja, a ação derivativa não é capaz de controlar um processo por si só, se faz necessário que o controle proporcional também seja utilizado.

2.2.4 Sintonia PID

A sintonia de um controlador PID é um processo amplo e desafiador. Sintonizar um controlador significa ajustar os parâmetros proporcional, integral e derivativo de modo a atingir a resposta desejada em um sistema de controle. Para tal, existem métodos empíricos e analíticos, que buscam encontrar valores para esses parâmetros.

> Com o sistema de controle instalado, os parâmetros do controlador PID devem ser ajustados até que o desempenho do sistema seja considerado satisfatório. Essa tarefa é conhecida como sintonia do controlador ou sintonia em campo do controlador. Visto que a sintonia é usualmente feita pelo método da tentativa e erro, essa tarefa pode ser tediosa e longa.(GARCIA,2017, p. 412).

Como descrito por Garcia, a maioria dos problemas práticos com sintonia são resolvidos de forma empírica, por tentativa e erro. No entanto, esse método, além de custoso no quesito tempo, também não pode ser aplicado em todos os sistemas. Além disso, pode ser que a máxima eficiência do controlador não seja alcançada.

Alguns softwares comerciais fornecem aplicações próprias para sintonia de controladores, usando derivados de métodos analíticos e teoria de controle para atingir as soluções. O programa Matlab® oferece recursos adequados para essas situações.

É o caso do aplicativo PID Tuner, que pode ser aplicado com objetivo de garantir a sintonia de controladores PID, baseando-se e modelos desenvolvidos pelo usuário ou através de dados retirados do sistema real.

> O aplicativo PID Tuner automaticamente define os ganhos de um controlador PID para um sistema SISO de modo a obter um balanço entre performance e robustez. Você pode especificar o tipo de controlador, como PI, PID com filtro derivativo, ou controlador PID com dois graus de liberdade. Gráficos de análise permitem que se examine a performance nos domínios do tempo e frequência. Você pode refinar a performance do controlador de forma interativa, ajustando a largura de banda e margem de fase ou selecionar entre rastreio de setpoint ou rejeição de perturbação. (MATHWORKS, 2019).

Como descrito no site do fabricante, o software é capaz de fornecer soluções e recursos para problemas de sintonia PID, contando com opções que permitem ao usuário a elaboração de uma sintonia que produz respostas confiáveis e eficientes para problemas de controle. Seu uso permite diferentes parâmetros sejam testados, ou seja, sistemas que já possuam controle podem ser otimizados através da simulação de diferentes parâmetros para o mesmo sistema de controle.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 O ESTUDO REALIZADO

A pesquisa realizada para a determinação de um adequado sistema de controle para tanque de receitas de micro cervejaria resultou de minucioso planejamento para determinação dos caminhos cientificamente corretos para a resposta à hipótese de trabalho (problema) previamente definida. “Chama-se hipótese de trabalho o lançamento de um problema que se pretende atacar através de uma elaboração cientifica.” (DEMO, 2012, p. 45).

Assim, o método de abordagem foi indutivo/quantitativo, sob nível explicativo e procedimento experimental. O método quantitativo requer dos envolvidos a análise as partir das mensurações obtidas, sem a interferência de indicações subjetivas. Ao mesmo tempo, o nível descrito foi explicativo pois, a resposta ao problema central, estava diretamente relacionada com a determinação de hipóteses parciais, variáveis dependentes e independentes e a manipulação destas.

O procedimento experimental permite a descrição e controle de variáveis independentes garantindo assim a isenção dos resultados obtidos, sem a “contaminação” de elementos estranhos ao processo.

> A força básica da pesquisa experimental está no controle relativamente alto da situação experimental e consequentemente das possíveis variáveis independentes. Isto significa que as relações podem ser estudadas isoladas da cacofonia do mundo exterior; as relações “puras” podem ser estudadas. (KERLINGER, 2003, p. 127).

Então, os resultados obtidos a partir deste procedimento poderão ser generalizados de maneira a serem utilizados por novas investigações ou ações de outras empresas que pretendam readequar seus processos de produção no que diz respeito à temática estudada.

3.2 VARIÁVEIS

A partir das hipóteses definidas:

H1: O modo de controle *on-off* será o mais eficiente no controle do processo.
H2: O modo de controle proporcional (ganho) será o mais eficiente no controle do processo.
H3: O modo de controle PD será o mais eficiente no controle do processo.
H4: O modo de controle PID será o mais eficiente no controle do processo.
H5: O processo exige um sistema mais robusto de controle.

Foram identificadas as variáveis independentes:
V1: Controle *on-off*;
V2: Controle proporcional;
V3: Controle PD;
V4: Controle PID.

O estudo resultou na aplicação de cada uma das variáveis, individualmente, e nos respectivos testes de verificação de eficiência empiricamente, fato gerador da determinação do método de controle adequado ao processo de produção pesquisado.

3.3 SISTEMA DE TRABALHO

O sistema de trabalho se baseia em um mini-tanque, isolado com 7 cm de lã de rocha, feito de aço inox 316, cujo aquecimento se dá através de uma resistência instalada ao fundo do tanque, com potência nominal de 6000 Watts. O tanque ainda conta com uma pequena bomba, que gera refluxo ao transportar o líquido do fundo dele até o topo, simulando assim uma agitação mecânica.

Para se controlar o processo de aquecimento, utiliza-se um controlador NOVUS N 1200, configurado com ação direta. O ciclo PWM é empregado para variar a potência da resistência entre 0 e 100% e a temperatura era medida através do sensor de temperatura PT-100, instalado próximo ao meio do tanque. As configurações do controlador foram feitas através do software Nconfig, disponibilizado pelo fabricante.

O sistema foi avaliado dentro de condições fixas, sendo elas:

- Preenchido com o volume de 20 litros de água tratada;
- A tampa foi mantida completamente fechada;
- A bomba atuava durante 100% do tempo, mantendo o sistema em constante refluxo
- O controlador se mantinha conectado ao computador de trabalho, onde eram aplicadas as configurações.

Figura 6-"Titã"- mini-tanque de receitas

Fonte: do autor, 2019.

Figura 7- Interior do titã

Fonte: do autor, 2019.

3.4 CRITÉRIOS DE CONTROLE

Os critérios aqui estabelecidos se baseiam nas necessidades do dono do mini-tanque de receitas, e definem a resposta mais cabível que o sistema deve apresentar para que o processo produtivo funcione, garantindo assim a qualidade das cervejas produzidas e uma perfeita emulação das condições reais de produção em maior escala. Ressalta-se que o mini-tanque é utilizado justamente para se evitar que os equipamentos de maior porte sejam mobilizados para testes de receita, portanto, é vital que ele consiga reproduzir as rampas de aquecimento de modo semelhante aos tanques de fervura e brassagem.

Os critérios elencados são:

1. Variação máximo ao redor do *set-point* de 0,5 °C;
2. Resposta rápida, que acompanhe o *set-point*;
3. Sistema robusto, capaz de atuar em diferentes rampas de temperatura;
4. Eliminação completa de *overshoot*, visto que o sistema é super isolado e não se resfria automaticamente.

3.5 CRONOLOGIA DE ETAPAS

A primeira etapa de desenvolvimento do trabalho consistiu-se em realizar um teste de *bump*, com o objetivo de observar o comportamento do titã quanto ao processo de aquecimento. Para tal, desligou-se o controle automático e ligou-se o controle manual com uma saída de 100% de resistência durante um período definido de tempo. Ao longo desse tempo, em um intervalo fixo de 10 segundos em 10 segundos, foi anotado o valor medido da temperatura no interior do tanque, através de leitura do visor do controlador industrial. Com esses dados, avaliados em função do tempo, é possível caracterizar o sistema em malha aberta.

Após o recolhimento da curva característica de variação de temperatura no sistema, ela foi exportada diretamente para o software Matlab, onde no ambiente do programa foram guardados esses valores em formato específico, necessários para que se possibilitasse a posterior análise da curva obtida, da qual surgirá a função de transferência aproximada do sistema, essencial para realizar a simulação das possíveis sintonias do controlador PID.

A próxima etapa foi submeter o sistema a um teste de eficiência para no modo de controle *on-off*. Para tal, se setou a banda proporcional para 0, ligando então o controle *on-off* do controlador novus 1200. Em sequência, uma rampa de *set point* foi determinada, sendo composta por uma subida linear que terminava em uma estabilização por um curto período de tempo. O controlador foi então ligado e a variação na variável do processo foi medida ao longo do tempo, estabelecendo-se a curva de controle característica.

Em seguida, a função de transferência do sistema foi aproximada através do Matlab, utilizando os dados coletados no teste de *bump*. A curva apresentou um comportamento similar a processo integrador, como esperado, isso porquê o isolamento do tanque impede que o calor escape, logo, todo calor que entra se mantém no interior do tanque. Para se aproximar com precisão, a característica de primeira ordem e de sistema integrador foi selecionada no software, o que permitiu a simulação mais precisa do modelo do sistema.

Em posse dos dados da planta (ou sistema de trabalho), o aplicativo *PID Tuner* foi empregado para se analisar as diferentes sintonias propostas pelas variáveis de pesquisa deste trabalho.

Inicialmente, a melhor condição de ganho para um controlador puramente proporcional foi simulada, se definindo um valor para Kp, que foi adaptado para banda proporcional e configura no controlador.

Com o controlador proporcional estabelecido, repetiu-se o teste executado no controle on-off, com o objetivo de criar uma carta de controle para o controle puramente proporcional. Novamente se estabeleceu uma rampa e os valores medidos de temperatura foram anotados.

Em seguida, o PID Tuner foi configurado para simular o controle do processo utilizando um esquema de controle PD. Feita a simulação de forma a atingir os critérios estabelecidos, um novo valor de Kp foi definido, juntamente com o valor de Td, que seria o tempo derivativo.

O controlador foi então configurado com esses parâmetros, e o sistema PD foi então testado de forma igual aos anteriores, sendo medida a temperatura com o passar do tempo após se aplicar uma perturbação rampa no *set point*.

Por fim, uma configuração PID foi simulada no PID Tuner. Tendo os parâmetros definidos, o controlador no modo PID também foi testado e uma nova carta de controle foi elaborada.

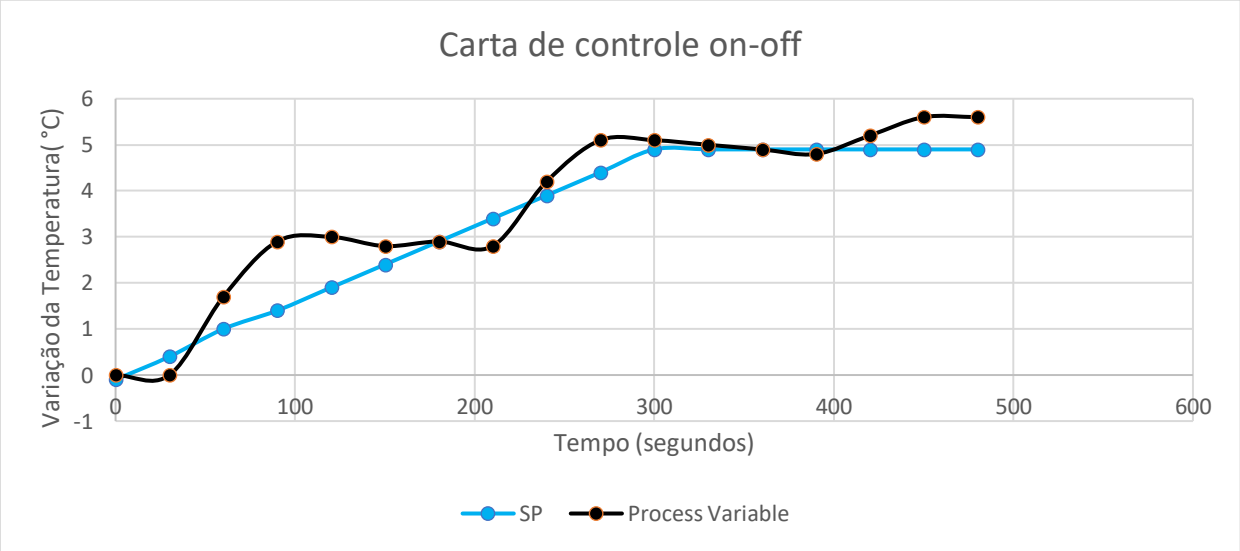
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os resultados encontrados após a aplicação dos testes citados na metodologia. Também serão discutidas as decisões tomadas e as respostas serão analisadas com o intuito de esclarecer os dados encontrados, relacionando-os com o referencial teórico exposto nesse trabalho.

4.1 CONTROLADOR *ON-OFF*

Como base significativa para compreensão dos resultados, iniciaremos pela análise da resposta do sistema ao controle do tipo *on-off*:

Gráfico 1- Curva de controle o processo em modo *on-off*



Fonte: do autor, 2019.

O controle *on-off* não necessita de sintonia fina, e sua histerese foi configurada para 0. Ao se analisar o gráfico 1 podemos retirar algumas conclusões. A resposta do sistema foi rápida, e ultrapassou o *set point* desejado deforma muito rápida. Isso se deve ao fato de que o controle *on-off* ativou 100% da potência da resistência logo na saída, e a manteve ligada até que a PV (process variable) cruzasse o *set point*, gerando a primeira curva acima do *set point* no gráfico.

O sistema então se mantém com uma variação de 3 °C, e lá se mantém até que a rampa do SP cruze essa estabilidade, gerando novamente uma saída do controlador. Então, o comportamento anterior se repete, e a PV novamente gera uma curva acima da linha da rampa do SP. Com o passar do tempo, entramos na parte reguladora do processo (a parte de estabilização, onde o controlador deve apenas manter a temperatura desejada).

Nessa etapa, o controle *on-off* novamente possui um desempenho insatisfatório, pois uma pequena variação abaixo do SP gera um resposta que lança PV a quase 1 °C acima do SP. Portanto, se analisarmos como um todo, o controle *on-off* foi rápido, no entanto, gerou curvas muito acima do *setpoint*, o que caracterizaria um aquecimento mais rápido que o ideal para produção da cerveja, afetando diretamente a qualidade.

Enfim, é notório que o controle *on-off* não atende nenhum critério estabelecido, portanto, sua adoção foi rejeitada. Vale ressaltar que a resposta apresentou as características exemplificadas no referencial teórico. E podemos entender empiricamente o que acontece através de um estudo do sistema como um todo.

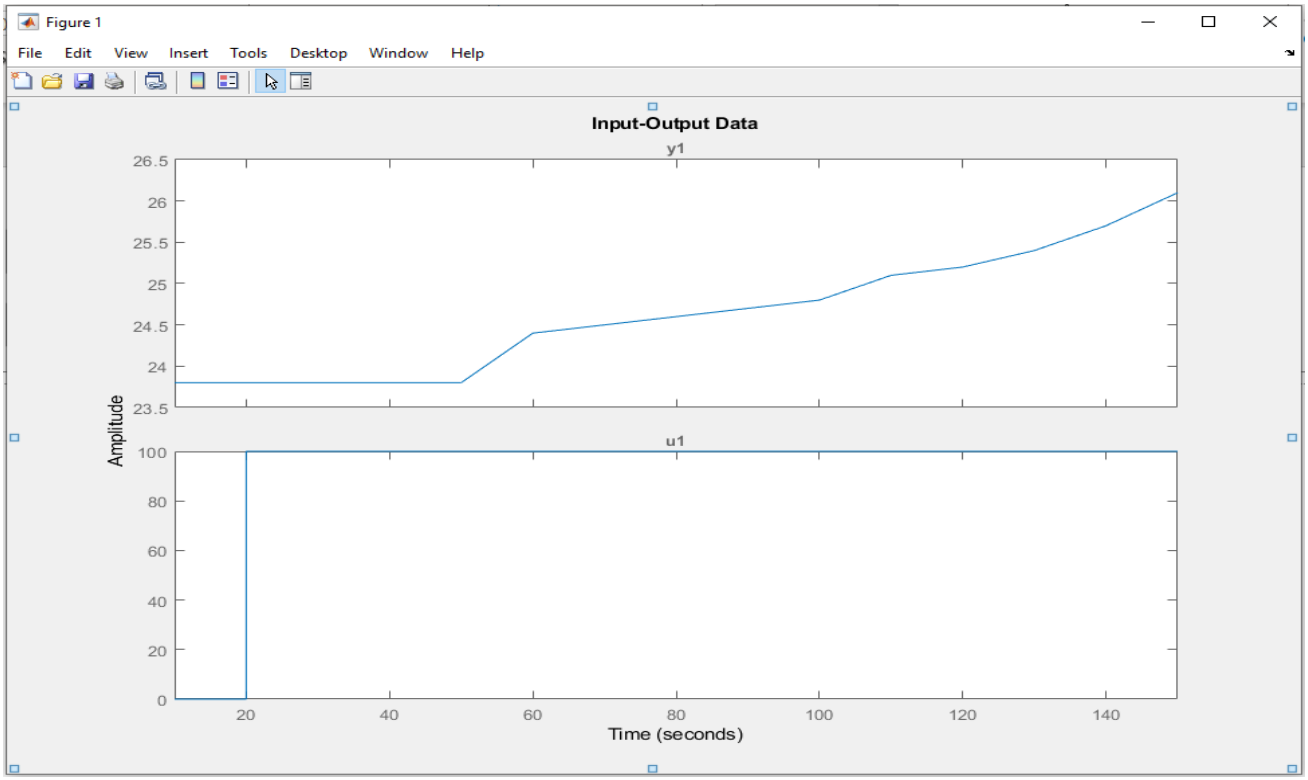
O sistema se baseia no aquecimento resistivo, e devido a localização do sensor, existe um determinado período de tempo para que ele acuse a variação de temperatura. Isso significa que ao se desligar a ação de controle, ou em outras palavras, quando o controlador gera uma saída de 0%, a resistência se desliga, mas o calor que foi gerado ainda será observado pelo sensor. Logo, como no modo *on-off* a resistência irá ficar ligada até o sensor medir PV=SP, é evidente que PV irá ultrapassar SP, pois a variação de temperatura ainda irá ocorrer durante certo tempo após o desligamento da resistência.

Isso explica esse comportamento de amplas curvas acima do *setpoint* no controle *on-off*, e invalida a aplicação dele no sistema de trabalho aqui estudado.

4.2 OBTENÇÃO DO MODELO DO SISTEMA

Como o controle *on-off* não se demonstrou efetivo, partimos para a sintonia de um controlador mais sofisticado. Começamos o processo através da análise dos dados obtidos através do teste de *bump*.

Gráfico 2-Dados de entrada-saída do sistema de trabalho



Fonte: do autor, 2019.

O gráfico 2 representa a relação entre a entrada do sistema, ou potência da resistência, na parte inferior, com a saída do sistema, no caso, a temperatura medida pelo sensor. O teste de *bump* nos permite identificar importantes informações sobre o funcionamento do sistema e suas características.

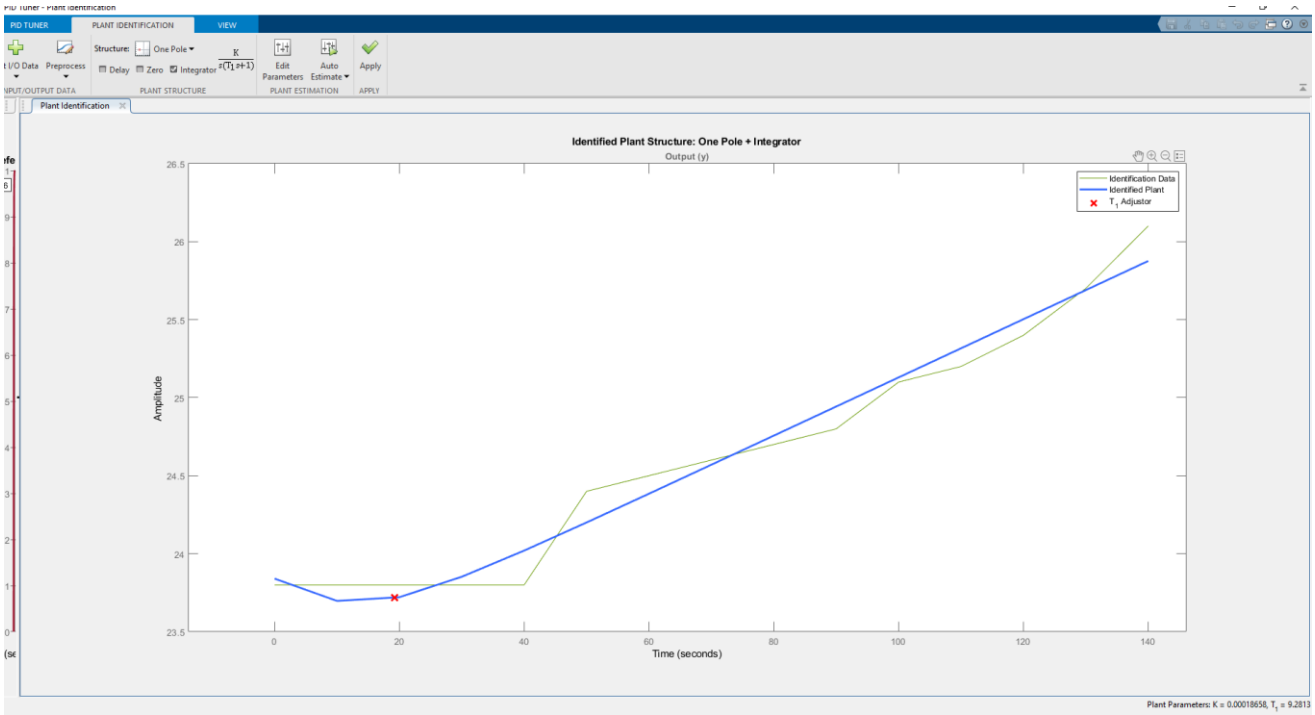
Ao se analisar a saída do sistema, podemos confirmar a situação elencada na análise do controle *on-off*, afinal, apesar da saída da resistência ser de 100% a partir dos 20 segundos, uma resposta na temperatura só é observada pelo sensor aos 45 segundos. Isso caracteriza o atraso (*delay*) na medição ou resposta do sistema, que precisa ser levado em consideração na sintonização do controle PID.

Além do atraso, pode-se observar uma característica integradora, típica de um sistema batelada, ou seja, característica não auto-regulatória. Na prática, a temperatura vai se acumulando e subindo em uma tendência aparentemente linear, intercalada com pequenas subidas mais íngremes, causadas pela natureza dos fenômenos de transferência de calor.

Com base nessas informações, podemos definir nosso sistema como integrador, com resposta unidirecional (ou seja, a temperatura nunca descerá dentro do tempo de processo). Essas características serão importantes para se definir uma função de transferência que

represente o processo e possa ser utilizada para a sintonia do controlador PID. A função de transferência foi obtida usando o recurso *Plant Identification* do Matlab.

Gráfico 3-Função de transferência do processo em comparação com a resposta em malha aberta



Fonte: do autor, 2019.

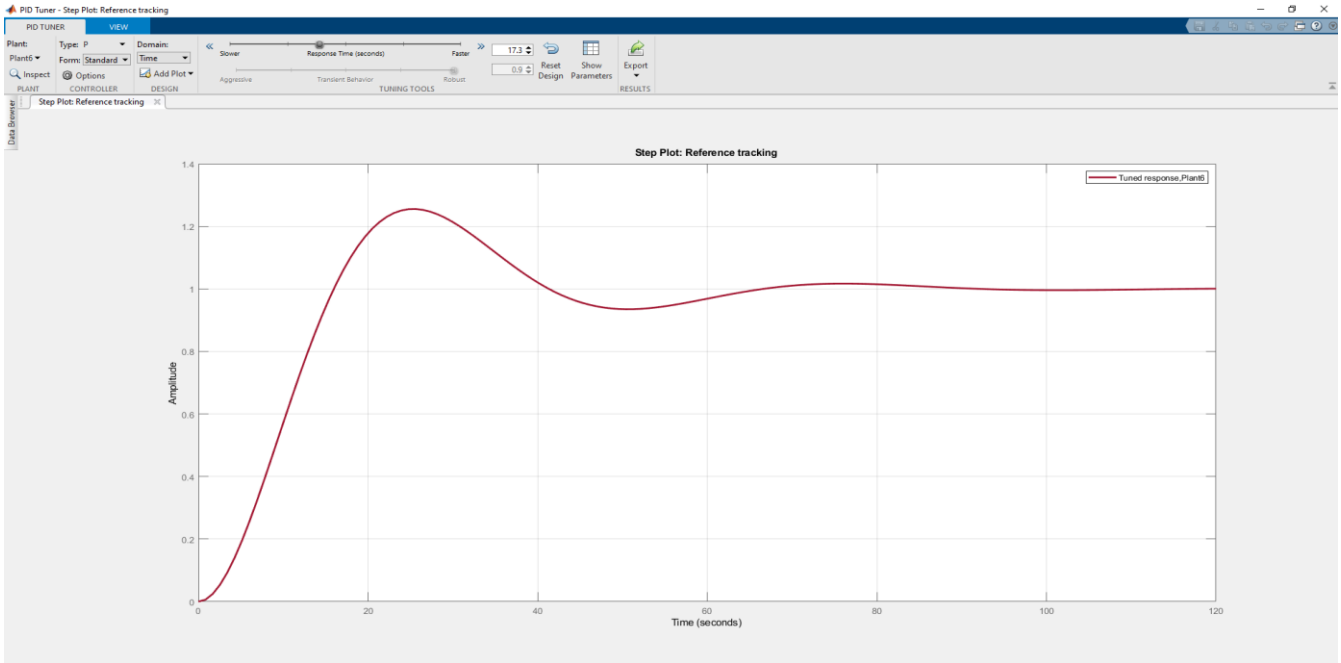
O gráfico 3 demonstra a determinação de uma função de transferência que se assemelha ao sistema de trabalho. A função foi aproximada como uma função de primeira ordem no domínio de Laplace e com um elemento integrador. A linha azul, que representa a função estimada, foi obtida através de estimativas automáticas realizadas pelo algoritmo do Matlab. É possível perceber que a função se assemelha com a apresentada no referencial teórico como uma aproximação de um processo integrador.

Com o modelo do sistema devidamente identificado, a próxima etapa é utilizá-lo para sintonizar o controlador. Vale ressaltar que o modelo estimado representou bem o comportamento do sistema, que ganha temperatura de forma muito similar a uma subida linear.

4.3 CONTROLE PROPORCIONAL

A próxima etapa é definir um controlador proporcional para esse modelo usando o PID Tuner. A resposta obtida foi:

Gráfico 4-Resposta simulada de uma perturbação degrau ao sistema controlado por um controlador puramente proporcional

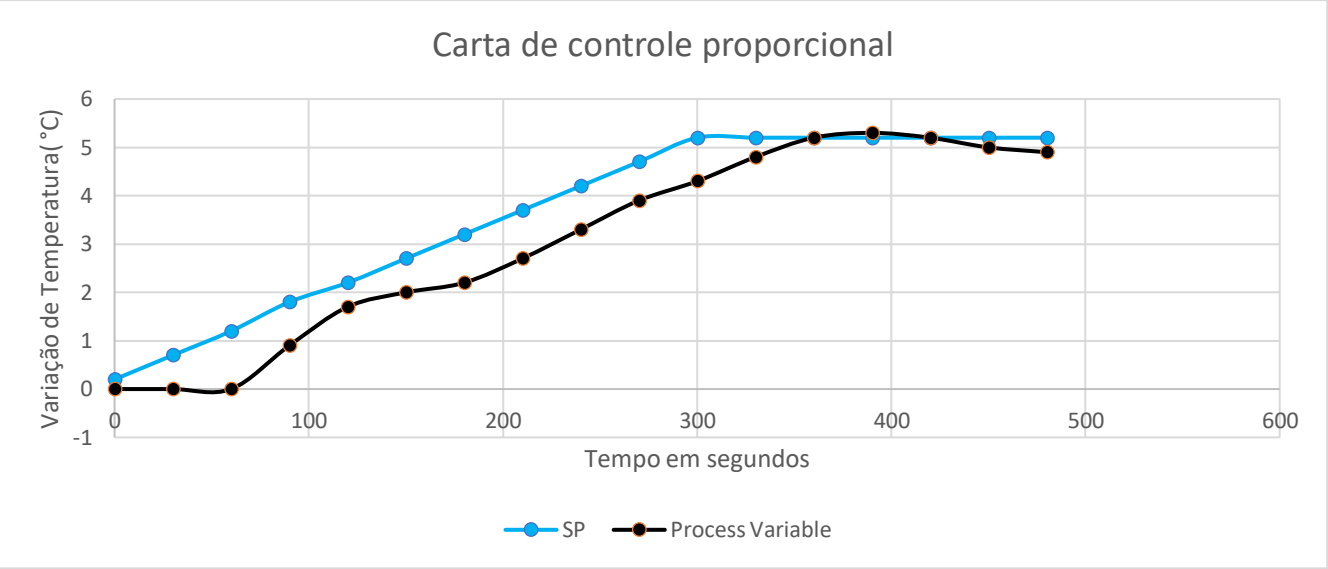


Fonte: do autor, 2019.

A resposta apresentada simulou bem um controlador proporcional, como elencado no referencial teórico, apresentando oscilações antes de atingir o setpoint. Na resposta simulada, temos uma velocidade de resposta aceitável, e um *overshoot* aparentemente dentro do critério 1, descrito na seção 3.4. O software descreve esse comportamento para um valor de Kp=300. Portanto, isso demonstra que o processo possui um alto ganho. Isso se traduz para a realidade, haja visto que para se variar um grau de temperatura, a resistência deve ficar ligada a 100% por certo período de tempo.

O parâmetro Kp foi então convertido para o valor 0,3 de banda proporcional, e aplicado no controlador. Então, o sistema foi testado empiricamente.

Gráfico 5-Curva de controle do processo controlado pelo controle puramente proporcional



Fonte: do autor, 2019.

O gráfico 5 demonstra o comportamento do processo controlado pelo controle proporcional com banda proporcional igual a 0,3. A resposta obtida acompanha muito bem o desenho da rampa do SP (set point), e o mantém dentro da variação aceitável do critério 1. O controle proporcional, portanto, apresentou uma resposta satisfatória, fazendo com que PV não ultrapasse o SP em nenhum momento, respeitando o critério 4. A resposta também foi rápida, acompanhando o SP de acordo com o critério 2.

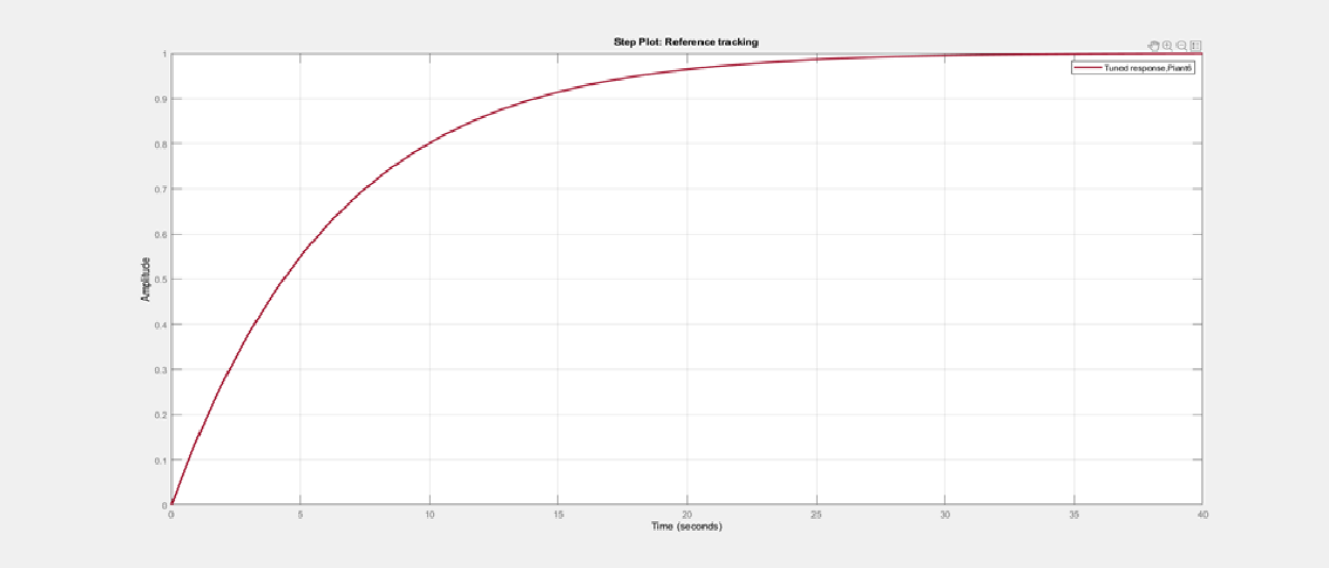
O único critério que gera dúvidas quanto a capacidade do controle proporcional é o critério 3. A rampa de testes apresentou uma resposta satisfatória, mas é possível que rampas mais agressivas, que precisam de respostas mais rápidas, não atinjam uma resposta satisfatória utilizando somente o controle proporcional.

Portanto, o controle proporcional pode ser aceito para o sistema em questão, com a ressalva de que o critério 3 pode não ser seguido em condições mais extremas, afetando sua robustez. Logo, em rampas que ficam próximas da subida de 1 °C por minuto podem ser submetidas a essa configuração. Para casos mais extremos, ele não é recomendado.

4.4 CONTROLE PROPORCIONAL-DERIVATIVO

A próxima etapa foi simular o controle proporcional-derivativo e estimar os parâmetros Kp e tempo derivativo, novamente utilizando o aplicativo PID *Tuner*.

Gráfico 6-Resposta simulada de uma perturbação degrau ao sistema controlado por um controlador proporcional-derivativo

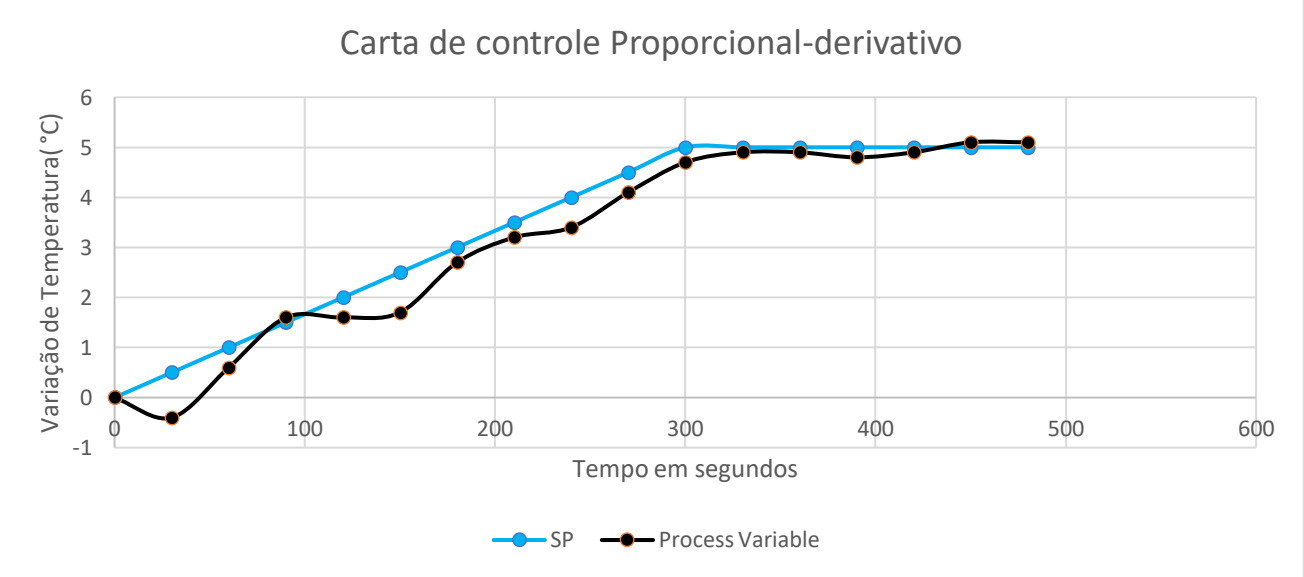


Fonte: do autor, 2019.

A resposta simulada descreve o comportamento de uma resposta sobre amortecida, onde o sistema não gera *overshoot* e se assenta diretamente no setpoint. Esse tipo de resposta é possível graças a utilização da ação derivativa, que evita erros futuros. O aplicativo gerou valores de Kp=1000 e Td=8. O aumento no ganho do processo permite que a resposta seja mais rápida, enquanto o tempo derivativo busca evitar o *overshoot* que seria inevitável caso o controlador fosse puramente proporcional.

Esses parâmetros foram aplicados ao controlador e o sistema foi então testado.

Gráfico 7- Curva de controle do processo controlado por um controlador proporcional-derivativo



Fonte: do autor, 2019.

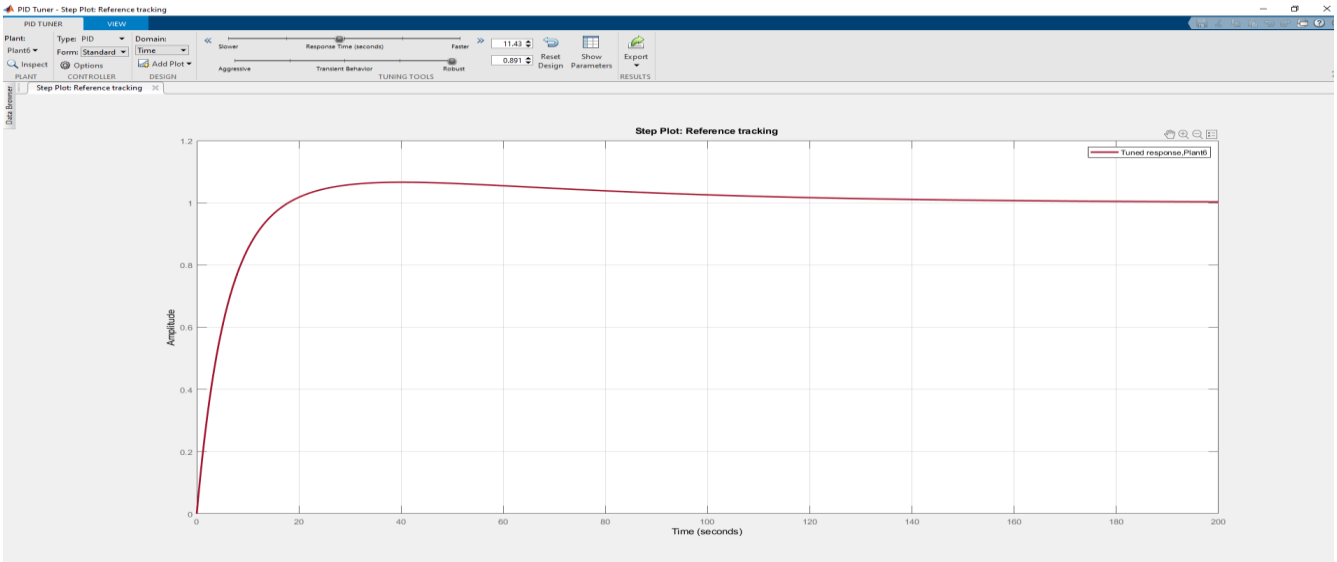
A resposta obtida apresenta um comportamento bem similar à rampa do *set point*, e evita *overshoot* ao longo da rampa. Além disso, ela é mais rápida que aquela apresentada pelo controlador puramente proporcional. De maneira geral, a resposta atende os 4 critérios estabelecidos, portanto, essa sintonia é aceita e gera uma resposta estável.

É interessante analisar como PV varia com pequenas ondulações ao longo da rampa, sinal da ação derivativa controlando o processo com o objetivo de evitar o *overshoot* iminente gerado pelo alto ganho. Também é possível notar que a resposta se assemelha muito ao comportamento superamortecido que foi simulado com o PID Tuner.

4.5 CONTROLE PID

Por fim, foi realizada a simulação de um controlador PID para o sistema.

Gráfico 8- Resposta simulada de uma perturbação degrau ao sistema controlado por um controlador proporcional-integral-derivativo

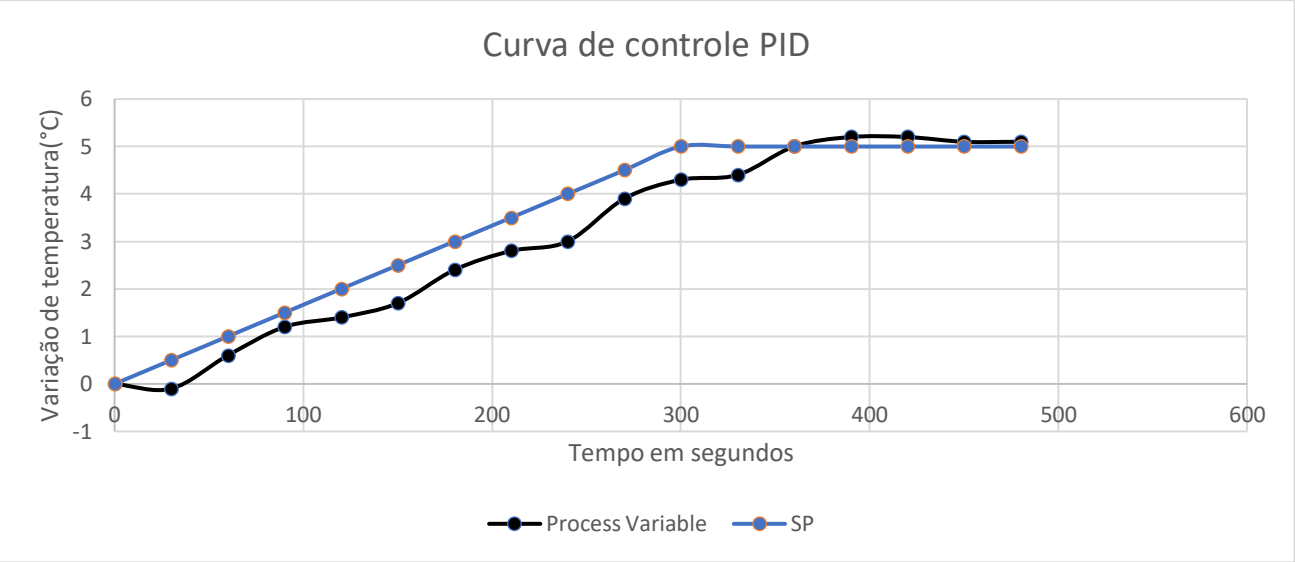


Fonte: do autor, 2019.

A resposta do controlador PID combina os três elementos e gera uma resposta rápida, no entanto, ela também conta com um pouco de *overshoot*. Os parâmetros fornecidos pelo aplicado foram Kp=900, Ti=1, Td=30.

É interessante notar que o sistema já simula um ganho integrativo pequeno, devido a natureza integrativa do processo. Esses parâmetros foram aplicados no controlador.

Gráfico 9-Curva de controle do processo controlado por um controlador PID



Fonte: do autor, 2019.

A resposta do controle PID apresenta característica similar ao controlador PD. No entanto, é notório que a fase de estabilização leva mais tempo para ser alcançada, isso se deve ao aumento no ganho derivativo, necessário devido a inclusão do controle integrativo. Desse modo, podemos dizer que o controle PID respeitou os critérios 2, 3 e 4, no entanto, gerou uma distância maior que 0,5 °C na fase de estabilização.

Para que o controle PID funcionasse adequadamente, o controle integrativo deveria ser mais atuante, no entanto, devido a natureza do nosso sistema de trabalho, que não permite overshoot, o parâmetro integrativo é desprezível, visto que ele não consegue atuar.

Conclui-se, então, pela rejeição do sistema PID para solucionar o problema de controle do sistema.

Devido a sua robustez e resultados, o controle PD é o mais indicado para realizar o controle do sistema.

5 CONCLUSÃO

Os sistemas de controle aqui estudados demonstram a versatilidade de opções que podemos encontrar quando se enfrenta problemas de controle. Além disso, as peculiaridades de cada sistema fazem parte das análises essenciais para se determinar qual estratégia se aplicar.

Na primeira estratégia abordada, o controle on-off se demonstrou pouco eficaz em seguir os critérios estabelecidos. Sua aplicação se tornou inviável devido aos valores de *overshoot* gerados pelo controlador.

Na segunda estratégia, o controle proporcional se mostrou eficiente no controle do processo, seguindo fielmente três, dos quatro, critérios estabelecidos. No entanto, sua aplicação é limitada, devido a falta de robustez para rampas que exijam maior velocidade de resposta.

A terceira estratégia, o controle proporcional-derivativo foi eficiente no controle do processo, respeitando todos os critérios estabelecidos. A combinação de proporcional e ação derivativa gerou a resposta amortecida condizente com a necessária para o controle do processo.

A última estratégia, baseada no controle PID, foi também eficiente em três, dos quatro, critérios. No entanto, sua eficácia total não pode ser aproveitada devido a natureza integradora do processo, portanto, seu uso não foi recomendado.

Por fim, o controlador PD foi o mais indicado para controlar o processo e produzir uma resposta estável e eficiente para o sistema de trabalho proposto.

6 REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRACERVA. **Associação brasileira de cerveja artesanal**. Disponível em: https://abracerva.com.br/. Acesso em 20/09/2019.

ASTROM, Karl J. **Feedback Systems**. Princeton University Press, New Jersey, 2008.

ASTROM, Karl J**. PID controllers: theory, designm and tuning**. 2. ed. United States of America, 1995.

BOLTON, W**. Engenharia de Controle**. São Paulo: Makron Book do Brasil, 1995.

CITYSYSTEMS. **Controle de temperatura**. Disponível em: https://www.citisystems.com.br/wp-content/uploads/2016/11/controle-de-temperatura-on-off.png. Acesso em 20/09/2019.

DEMO, Pedro. **Pesquisa e construção de conhecimento: metodologia científica no caminho de Habermas**. 7. ed. Rio de Janeiro: Tempo brasileiro, 2012.

GARCIA, Claudio, **Controle de processos industriais**, volume 1, São Paulo: Blucher, 2017.

KERLINGER, Fred Nichols. **Metodologia da pesquisa em ciências sociais:** um tratamento conceitual. 9. ed. Tradução: Helena Mendes Rotundo. São Paulo: EPU, 2003. 378 p.

MATHWORKS. **PID Tuner.** Disponível em: https://www.mathworks.com/. Acesso em 20/08/2019.

NOVUS. **Catálogo de produtos.** Disponível em: https://www.novus.com.br/. Acesso em 20/08/2019.

OGATA, Katsujiko. **Engenharia de controle moderno**; tradutora Heloísa Coimbra. 5. ed. São Paulo, 2010.

SKOGESTAD, S., "**Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning**", Journal of Process Control, 2003.

SUNG, Su. **Process identification and PID control**, John Wiler and Sons pte Ltd. Singapore, 2009.

VILLANOVA, R., "IMC based Robust PID design: Tuning guidelines and automatic tuning", Journal of Process Control, 2008.

VISIOLI, Antonio. **Pratical PID control**. Springer-Verolag, London, 2006.