

Modelagem de PID para sistema de controle de rampas de temperatura em brassagem

Gabriel Queiroz
Fac. Eng. Elétrica
Univ. Fed. de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
gqueiroz1601@gmail.com

Marcelo Barros de Almeida
Fac. Eng. Elétrica
Univ. Fed. de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
marcelo.barros@ufu.br

Márcio Jose da Cunha
Fac. Eng. Elétrica
Univ. Fed. de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
mjcunha@ufu.br

Resumo - O objetivo deste artigo é apresentar uma estratégia capaz de realizar a modelagem de um processo de aquecimento e manutenção de rampas de temperatura com foco em tinas de brassagem de nanocervejarias. Nessas situações, o elemento de aquecimento é geralmente representado por resistências elétricas ou chamas a gás, ambos do tipo ligado/desligado, demandando também uma estratégia específica para entrega da potência calculada pelo controlador PID, descrita e analisada neste trabalho. Foram empregados dados obtidos empiricamente através do aquecimento de volumes proporcionais de água e ebulidores elétricos para a criação do modelo.

Palavras Chaves - Controlador de brassagem, modelagem, PID

PID modeling for heater control system in brewing

Abstract - The aim of this paper is to present a strategy for modeling a heating process where it is necessary to follow specific temperature slopes with focus on mashing tuns for nano brewers. In this situation, the heating element is generally represented by electric heaters or gas, both on/off, demanding a specific strategy for delivering the amount of power calculated by the PID controller, also described and analyzed in this work. For creating the model, data were empirically obtained by heating proportional volumes of water using a electric boiler.

Keywords - Brewing controller, modeling, PID

I. INTRODUÇÃO

Durante o processo de brassagens, realizados em cervejarias de qualquer porte, é preciso executar uma série crescente de rampas controladas de temperatura, atuando nas diversas fases do processo de extração da maltose [1]. Ações enzimáticas bem controladas, em determinadas temperaturas e faixas de pH, promovem uma boa sacarificação do mostro, aumentando a eficiência do processo [2]. Assim, é importante a precisão no controle das rampas de temperaturas nas diversas fases, sendo uma aplicação adequada para controle automatizado.

A proposta deste trabalho é apresentar o processo de modelagem de um controlador PID digital [3] assim como uma proposta de discretização da saída do PID para

acionamento de um elemento de aquecimento do tipo ligado/desligado (ou *on/off*, em Inglês) visando o controle das rampas de temperatura em processo cervejeiros.

Trabalhos similares podem ser encontrados na literatura. Por exemplo, em [4], é discutido um controlador microprocessador de baixo custo, também empregando estratégias com PID. No entanto, este trabalho não menciona formas de modelagem, como a descrita aqui, além de possuir uma estratégia de acionamento do elemento de aquecimento baseado em bandas de erro, mantendo, no fundo, um controle puramente *on/off*.

Discussão parecida é apresentada em [5], onde são propostos três algoritmos de controle PID e o uso de um processador digital de sinal (DSP). Não são discutidas formas de aplicação da saída de controle no elemento de aquecimento, sendo apresentados apenas dados de simulação, o que sai do escopo deste presente trabalho.

Finalmente, trabalhos com maior corpo podem ser encontrados nas referências [6], [7], com um resultado bastante aplicado na execução de múltiplas rampas de temperatura. Um controle do tipo *Bang-Bang*, onde o sistema deve sair de um ponto de operação (*set point*) para outro com a menor resposta temporal possível, é apresentado. A este modelo é acoplado um modelo preditivo de controle, gerando uma estratégia denominada pelos autores de *Compound Optimal Control*, com promessas de menor *overshoot* e tempo de acomodação curto. Este artigo, apesar de não discutir também a forma de entrega de potência, apresenta-se como uma referência futura importante para este trabalho.

II. MODELO EMPÍRICO DE TINA DE BRASSAGEM

Para o desenvolvimento do modelo, será usada uma tina pequena com água e com volume de quatro litros, aquecida por uma resistência elétrica com potência de 1kW. Equipamentos comerciais apresentam relações de volume/potência (4L/1kW) similares, sendo essa a razão da escolha destes valores.

É sabido que, no processo real, a existência de grãos embebidos na água (mostura) muda a dinâmica do processo por apresentar uma capacidade térmica diferente. Também é possível que a forma de aquecimento utilizada seja diferente, podendo ser um controle automatizado de gás do tipo liga/desliga ou uma caldeira. No entanto, isto não invalida a estratégia proposta, uma vez que basta refazer o experimento



de aquisição de valores para posterior modelagem do PID e talvez realizar pequenas mudanças na forma proposta de entrega de potência.

Um ponto importante nessa modelagem é a uniformização da temperatura da mistura. Durante todo o ensaio, o líquido é misturado, deixando sempre a temperatura uniforme e evitando aquecimentos exagerados para volumes próximos do elemento de aquecimento. Em processos reais isso também é sempre feito, evitando que o malte perto do elemento de aquecimento seja queimado [2]. Neste modelo, a agitação será feita de forma manual.

O sistema usado para coleta de dados é apresentado na Figura 1, composto de um elemento de aquecimento representado por uma resistência elétrica de 1kW de potência controlada por um relé. Um sensor de temperatura DS18B20 [8], da Maxim, também foi empregado, com $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ de precisão na faixa de -10°C to $+85^{\circ}\text{C}$. Tanto o sensor quanto o relé foram interligados em um microcontrolador ATmega328P, via uma placa Arduino Uno [9].

Foi escolhida a rampa de 62°C para a análise e modelagem do sistema. A escolha foi baseada no processo cervejeiro, onde é comum o emprego de rampas por volta de 62°C para a ação da proteína beta amilase, assim com rampas de 68° (proteína alfa amilase) e 50°C (parada proteica) [2].

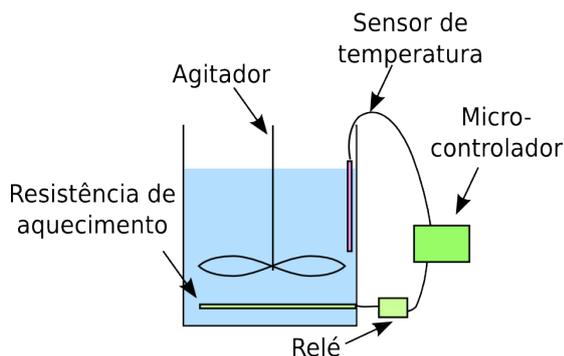


Fig. 1: Protótipo para coleta de dados.

Nesse sistema, foi definida uma taxa de amostragem de temperatura de um segundo, adequada para a dinâmica do processo. O microcontrolador realizava então a programação da rampa, ligando a resistência através do relé até que a temperatura fosse superior ao valor da rampa. Nesse momento, o relé era desligado, criando uma curva de temperatura em resposta ao degrau de aquecimento (Figura 2).

Os dados provenientes da temperatura amostrada e do estado do relé (ligado ou não) eram então registrados, sendo a base para a identificação e modelagem posterior do PID. No ensaio realizado foram coletadas 364 amostras.

III. MODELAGEM PID

A partir dos resultados recolhidos na amostragem da rampa de 62°C , foi empregada a ferramenta Matlab para auxiliar na extração do modelo do sistema representativo da rampa de temperatura e no posterior cálculo do controlador PID.

Os dados foram armazenados em um arquivo texto com duas colunas, onde a primeira coluna é o estado do relé (0

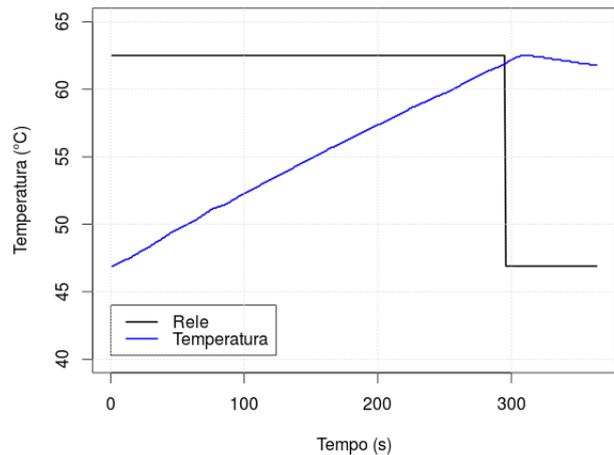


Fig. 2: Dados obtidos (azul) em resposta ao acionamento do relé (azul)

ou 1, para ligado ou desligado, respectivamente) e a segunda é o valor da temperatura. Essas colunas são separadas por ponto e vírgula.

É possível obter um modelo do sistema (Listagem 1), cuja função de transferência é dada na Equação 1. No caso, foi estimada uma função com dois pólos e um zero após verificação empírica de que ordens maiores não necessariamente geravam resultados melhores.

O resultado obtido pode ser contrastado com os dados originais (Figura 3), evidenciando um ajuste de 94,66% da função gerada aos dados amostrados.

```
dados = dlmread('dados.txt',';')
x = dados(:,1)
y = dados(:,2)
sysdata = iddata(y,x,1)
sys = tfest(sysdata,2,1,nan)
compare(sysdata,sys)
```

Listagem 1: Estimação da função de transferência

$$sys(s) = e^{-12s} \frac{-0,2559s + 0,04376}{s^2 + 0,5326s + 0,0002843} \quad (1)$$

A Equação 1 pode ser simplificada, evitando o termo exponencial e gerando apenas uma expressão com dois polinômios para numerador e denominador. Isso facilita a discretização do sistema através da transformada Z [3] e também criação de equações diferenças. Vale lembrar que essa exponencial é geralmente a representação de um tempo morto existente no sistema.

A simplificação pode ser realizada através da aplicação do “Método dos aproximantes de Padé” [10], como apresentado na Listagem 2. A Equação 2 é o resultado desta operação e o valor do novo ajuste, entre os dados e o sistema aproximado por Padé, é de 95,24% (ver Figura 4). Esta nova expressão será a utilizada deste ponto em diante.

```
sys_pade = pade(tf(sys),1)
```

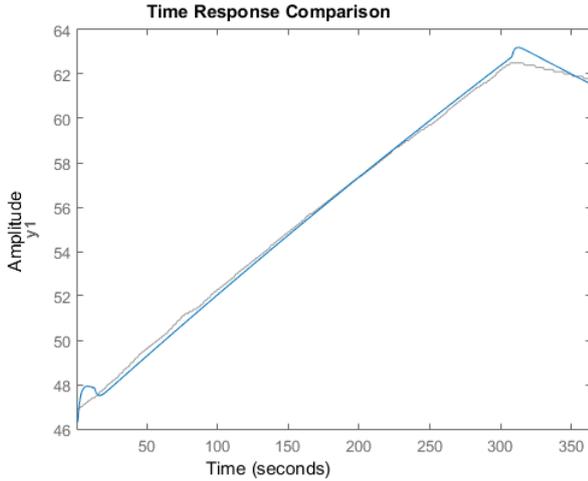


Fig. 3: Função de transferência estimada pelo Matlab em azul e dados originais, em vermelho

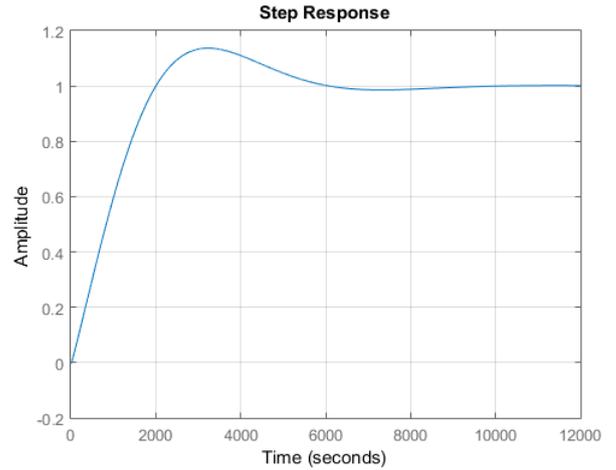


Fig. 5: Resposta ao degrau para o PID estimado automaticamente pelo Matlab.

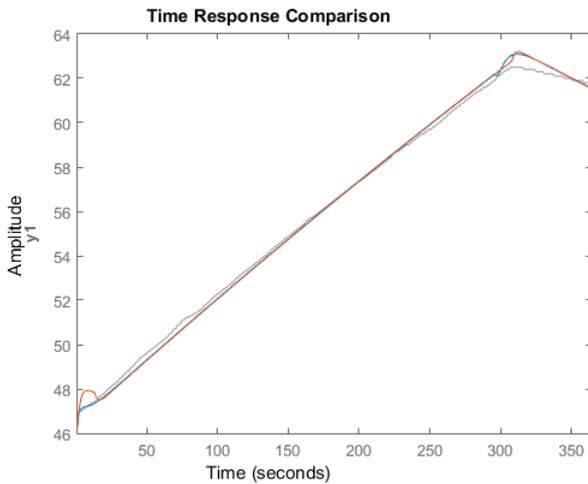


Fig. 4: Comparação entre o sistema modelado com e sem aproximação por Padé.

```
compare(sysdata, sys_pade, sys)
```

Listagem 2: Aproximação por Padé

$$sys_p(s) = \frac{0,2559s^2 - 0,08642s + 0,007294}{s^3 + 0,6992s^2 + 0,08904s + 0,00004738} \quad (2)$$

Com o sistema devidamente representado, é possível realizar a definição dos valores do PID. O Matlab possui uma ferramenta denominada “pidtool” capaz de gerar as constantes proporcionais (k_p), derivativas (k_d) e integrais (k_i). O resultado do emprego dessa ferramenta é apresentado na resposta ao degrau presente na Figura 5, com valores $k_p = 0,0561$, $k_i = 0,0000568$ e $k_d = 0$. Esta resposta apresenta como inconveniente um tempo demasiadamente longo para acomodação do valor. Por esta razão, decidiu-se realizar uma sintonia manual, com o emprego da ferramenta “PID Tune”, também presente no Matlab. Com a ferramenta

PID Tune é possível alterar manualmente as configurações do sistema, como o tempo de subida, tempo de acomodação, overshoot, etc.

Por tentativas sucessivas foi obtido um conjunto mais adequado para o sistema a ser controlado, com as constantes $k_p = 0,4$, $k_i = 0,001$ e $k_d = 0$ e tempo de amostragem de um segundo ($T_s = 1$). Como resultado, a nova resposta ao degrau pode ser observada na Figura 6, com um tempo de acomodação menor. A Equação 3 representa esse PID, já em Z. Com o PID projetado, obtê-lo em Z é um processo simples no Matlab, através do emprego da expressão `c2d(tf(pid), 1)`, sendo “pid” o PID projetado e 1 a taxa de amostragem.

$$PID(z) = 0,4 + \frac{0,001}{z - 1} \quad (3)$$

Apenas para referência, as Figuras 5 e 6 podem ser levantados com o emprego das Listagens 3 e 4.

```
ctrl = pid(0.0561, 5.68e-05)
pid_fb = feedback(ctrl*sys_pade, 1)
opt = stepDataOptions('StepAmplitude', 65);
step(pid_fb, opt)
```

Listagem 3: Resposta ao degrau para PID obtido automaticamente

```
ctrl = pid(0.4, 0.001)
pid_fb = feedback(ctrl*sys_pade, 1)
opt = stepDataOptions('StepAmplitude', 65);
step(pid_fb, opt)
```

Listagem 4: Resposta ao degrau para PID manualmente

Com o controlador definido, é preciso transformar o seu valor de saída, um número real, em um modo de acionamento do elemento de aquecimento (no caso, a resistência *on/off*). O uso de modulação por largura de pulso (PWM) é relativamente comum em situações similares [3]. No entanto, a natureza eletromecânica do relé impede que exista um

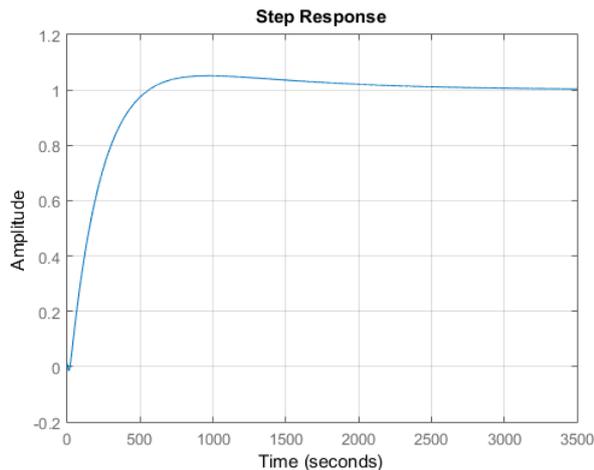


Fig. 6: Resposta ao degrau para o PID estimado manualmente.

chaveamento em taxa elevada, o que levaria a um desgaste prematuro desse elemento.

Para contornar esse problema, foi criado um sistema de entrega de 10 níveis de potência por meio de um PWM lento, com ciclo de 10 segundos. Também foi utilizado um relé de estado sólido, evitando mecanismos eletromecânicos, ambos descritos na próxima seção.

IV. MODELAGEM PWM

O sistema proposto para implementação do PWM possui 10 níveis de potência, com um ciclo de 10 segundos. É empregado também um relé de estado sólido da Fotek [11] com chaveamento programado apenas para pontos de tensão igual a zero, resultando em maior proteção e vida útil dos elementos envolvidos.

Os níveis de potência estão apresentados na Figura 7. Estes níveis foram criados para permitir um aumento gradual da potência entregue, em incrementos de décimos de unidade, sempre aproximando o valor do nível para o múltiplo inteiro mais próximo de estados em 1 (ligado) ou 0 (desligado). Por exemplo, uma saída do controlador entre 0 e 0,1 ativa o nível um de potência, gerando um segundo de acionamento da resistência contra nove segundos com a resistência desligada. No nível 9, com saída do controlador entre 0,9 e 1, por sua vez, a resistência ficaria ligada 90% do tempo (nove segundos), com apenas um segundo desligada.

Um aspecto interessante que precisa ser evidenciado é que, exceto quando a saída do controlador é negativa, não existe nenhum nível onde o sistema fica o tempo inteiro desligado. Isso se deve ao fato de que o sistema perde calor para o meio, sendo necessário uma nível mínimo de aquecimento.

Dessa forma, a discretização da saída do controlador se torna possível. Como o sistema controlado tem inércia suficiente, é aceitável a alteração do ciclo a cada 10 segundos.

V. SIMULAÇÃO DE SISTEMA NO SIMULINK

Para a análise e melhor entendimento de todo o processo desenvolvido, foi realizada também uma simulação

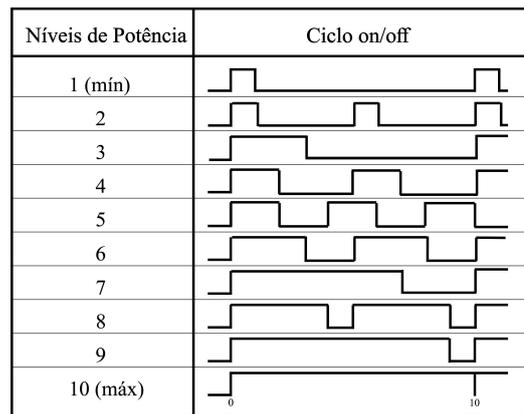


Fig. 7: Níveis de potência usados para o PWM

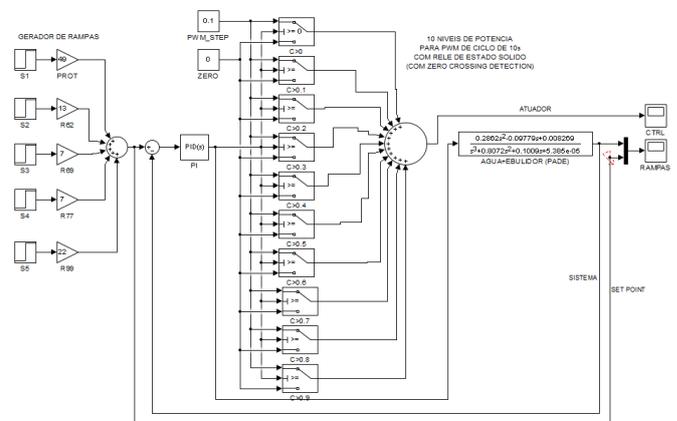


Fig. 8: Simulação do esquema empregado para PWM no Simulink

do modelo do sistema mais controlador e PWM através do Simulink, com a estratégia utilizada apresentada via Figura 8. Os resultados de controle, mesmo em rampas diferentes da originalmente utilizada, foram satisfatórios, como pode ser observado nas Figuras 9 e 10.

No caso, foram criadas cinco rampas de temperatura (49°C, 62°C, 69°C, 77°C e 98°C) para validação do controlador, indicadas em rosa na Figura 9. A resposta do sistema controlado é dada pela curva em amarelo. É possível notar que o sistema responde melhor perto da temperatura da modelagem, com menor *overshoot* e acomodação mais rápida. Isto sugere que o sistema pode ser melhorado ou parametrizado de forma diferente para operar em outras rampas de temperatura com a mesma eficácia.

A entrega de potência, nos seus níveis discretizados, pode ser visualizada através da Figura 10. Em toda mudança de rampa o sistema reage com a abertura total da ação de controle (resistência o tempo toda ligada) por algumas dezenas de segundos, permitindo a rápida elevação da temperatura. A aproximação do valor da rampa gera uma diminuição da potência entregue, como previsto para um sistema baseado em realimentação do erro.

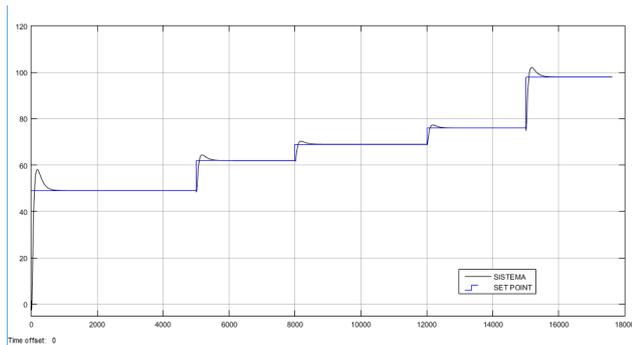


Fig. 9: Set points das cinco rampas (em amarelo) testadas e as respectivas reações do sistema aos novos set points (em rosa).

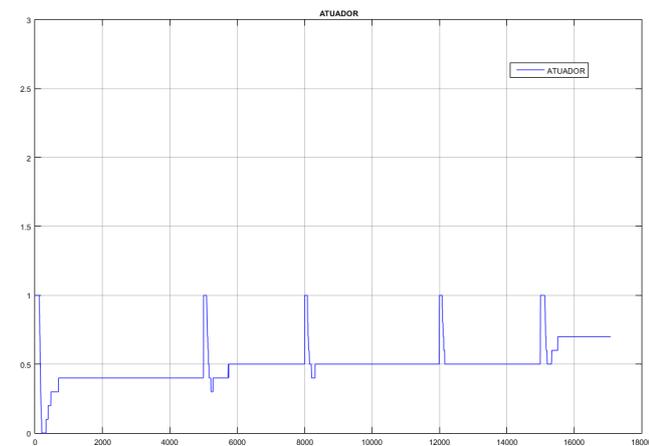


Fig. 10: Gráfico do atuador no tempo, ligando e desligando conforme as mudanças do sistema

VI. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma estratégia de modelagem de dispositivo para controle de rampas de temperatura, tipicamente encontradas em tinas de brassagem de nanocervejarias. Após a modelagem do sistema e da criação de uma estratégia de entrega de potência de dez níveis para um elemento de aquecimento, o sistema foi simulado. Os resultados obtidos demonstram a capacidade de controle do sistema proposto, com pequeno *overshoot* e baixo tempo de acomodação.

VII. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam agradecer à UFU que, através do programa de Jovens Talentos, permitiu a realização desse trabalho. Também é importante agradecer ao time do LASEC (Laboratório de Sistemas Eletrônicos e Controle), parte do curso de Controle e Automação.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Barth, *The Chemistry of Beer: The Science in the Suds*. John Wiley & Sons.
- [2] D. E. Briggs, C. A. Boulton, and P. A. Brookes, *Brewing: Science and Practice*. Woodhead Publishing.
- [3] K. Ogata, *Engenharia de Controle Moderno*. Pearson.
- [4] M. Weeks, "Arduino controlled brewing," in *SoutheastCon 2015*, April 2015, pp. 1–5.

- [5] G. Yanli, L. Di, and Z. Haiying, "Beer fermentation temperature control system based on dsp," in *Electronic Measurement Instruments (ICEMI), 2011 10th International Conference on*, vol. 1, Aug 2011, pp. 274–277.
- [6] S. Jiliang, Y. Wei, and G. Dexin, "Study of compound optimal control for beer saccharification temperature," in *2007 Chinese Control Conference*, July 2007, pp. 356–359.
- [7] J. I. Shang, X. h. Dou, and Y. Wei, "Application study of optimal control for beer saccharification temperature," in *2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Sept 2008, pp. 1750–1753.
- [8] DS18B20 1-wire digital thermometer. [Online]. Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [9] Projeto arduino. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>
- [10] R. Bock and W. Krischer, *The Data Analysis Briefbook*. Springer.
- [11] Fotek, dc to ac solid state relay. [Online]. Available: <http://www.fotek.com.hk/solid/SSR-1.htm>