

Ricardo Henrique da Silva Assis

**Controle da temperatura de um componente metálico
por resfriamento ativo por quase-imersão**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2020

Ricardo Henrique da Silva Assis

**Controle da temperatura de um componente metálico
por resfriamento ativo por quase-imersão**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Mecatrônica da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
BACHAREL em **ENGENHARIA
MECATRÔNICA.**

Área de concentração: Controle Digital

Orientador: Pedro Augusto Queiroz de Assis

UBERLÂNDIA - MG

2020

Controle da temperatura de um componente metálico por resfriamento ativo por quase-imersão

Projeto de conclusão de curso
APROVADO pelo Colegiado do Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica da
Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Augusto Queiroz de Assis
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Ruham Pablo Reis
Universidade Federal de Uberlândia

MSc. Fernando Matos Scotti
Universidade Federal de Uberlândia

UBERLÂNDIA - MG

2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a toda a minha família por todo apoio que me deram e por todos os sacrifícios feitos durante toda a minha jornada na graduação.

Em seguida gostaria de dizer que sou eternamente grato aos meus companheiros de apartamento, Eder e José Carlos que sempre me apoiaram. Além disso, gostaria de agradecer os meus amigos Igor, André, Thiago, Otacilio, Felippi, Rafael, Wesley e Lilian Karla pelo apoio constante, companheirismo e por sempre estarem comigo nos meus piores momentos e me ajudando a superá-los. E também gostaria de agradecer pela ajuda de todos os meus colegas com quem estudei durante esses 5 anos, em especial o Carlos, o Italo e ao Vinicius, com os quais eu mais compartilhei momentos.

Ademais, vejo necessário agradecer ao Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem (LAPROSOLDA) e ao Laboratório de Ensino a Mecatrônica (LEM) pela ajuda fornecida através de seus integrantes e por me emprestarem instrumentos que foram extremamente necessários durante a construção do protótipo. E também ao CNPq e a Petrobras pelas bolsas concedidas durante este projeto. Por fim, agradeço ao Dr. Prof. Pedro e a Dra. Prof. Rosenda, que me ensinaram não apenas conhecimentos técnicos, mas também serviram como um grande exemplo de honestidade e profissionalismo.

Assis, S. H. R. **Controle da temperatura de um componente metálico por resfriamento ativo por quase-imersão**. 2020. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

Resumo

A manufatura aditiva de componentes metálicos permite confeccionar peças de diferentes geometrias com custo unitário reduzido e com maior rapidez ao ser utilizada para produção em baixa escala, se comparada a métodos tradicionais de fabricação. Dentre as diferentes técnicas para realização de manufatura aditiva de componentes metálicos, a deposição a arco (MADA - Manufatura Aditiva Por Deposição a Arco) se destaca devido ao baixo custo de implementação, às elevadas taxas de deposição e à boa integridade das peças. Como desvantagem, pode ocorrer um acúmulo de calor na peça resultante da deposição do material, o que pode causar não conformidades de diferentes tipos. Para reduzir o acúmulo de calor, foi proposto na literatura o resfriamento ativo por quase-imersão (RAQI). A ideia fundamental do RAQI consiste em depositar o material em uma cuba na qual o nível de um líquido de resfriamento (em geral água) é mantido a uma distância fixa do topo da pré-forma. Desse modo, tem-se uma redução significativa do acúmulo de calor. Quanto mais próximo o líquido estiver da camada de deposição, maior será o arrefecimento. Uma possibilidade para aumentar a versatilidade do RAQI é adotar uma estrutura de controle em malha fechada para controlar a temperatura de interpasse, isto é, a temperatura das camadas entre os passes de deposição. Como resultado, seria possível fazer com que tal temperatura seguisse valores de referência fornecidos por um operador. Como etapa inicial do projeto de tal sistema de controle, o presente trabalho envolveu a construção de um protótipo com as principais características de uma máquina de MADA com RAQI. Nesse desenvolvimento, substituiu-se a cuba de deposição por um tanque. Mais ainda, um conjunto resistência elétrica e chapa de alumínio representou a fonte de energia e a pré-forma, e o computador e o sistema de bombeamento do processo real foram substituídos por um Arduino UNO e um conjunto de tanques e bomba DC, respectivamente. Com o protótipo construído, implementou-se um controlador para rastrear referências de temperatura para a chapa de alumínio. Em particular, adotou-se um controlador proporcional-integral. Os parâmetros do controlador

foram ajustados com base no método da resposta ao degrau Ziegler e Nichols e refinados experimentalmente. Para melhorar o desempenho do controlador, adotou-se a integração condicional para eliminação do *windup*. Além disso, uma técnica heurística foi implementada para diminuir o tempo de convergência. Essa técnica consistiu em modificar a ação de controle por um intervalo curto de tempo quando o erro de rastreamento fosse maior do que uma tolerância. Os resultados mostraram que foi possível guiar a temperatura da chapa para o entorno de valores de referência. Para isso, o sistema de controle altera o nível de água no tanque em que a resistência é posicionada. Tal resultado indica que também pode-se controlar a temperatura de interpasse no processo real.

ABSTRACT

The additive manufacturing of metallic components allows the production of parts with different geometries with reduced unit cost and faster speed when used for low scale production, when compared to traditional manufacturing methods. Among the different techniques to perform additive manufacturing of metallic components, WAAM (Wire + Arc Additive Manufacturing) stands out due to its low implementation cost, high deposition rates, and good part integrity. As a disadvantage, there is a build-up of heat on the part resulting from the deposition of the material, which can cause non-conformities of different types. To reduce heat buildup, near-immersion active cooling (NIAC) has been proposed in the literature. The fundamental idea of NIAC is to deposit the material in a tank in which the level of a cooling liquid (usually water) is kept at a fixed distance from the top of the preform. This significantly reduces heat buildup. The closer the liquid is to the deposition layer, the greater the cooling. One possibility to increase the versatility of the NIAC is to adopt a closed loop control structure to control the interpass temperature, that is, the layer temperature in between the deposition passes. As a result, it would be possible to make this temperature follow reference values provided by an operator. As an initial step in the project of such a control system, the present work involved the construction of a prototype with the main characteristics of a WAAM machine with NIAC. In this development, the deposition vat was replaced by a tank. Moreover, an electrical resistance and an aluminum plate set represented the energy source and the preform, and the computer and the pumping system of the real process were replaced by an Arduino UNO and a set of tanks and DC pump, respectively. With the prototype built, a controller was implemented to track temperature references for the aluminum sheet. In particular, a proportional-integral controller was adopted. The controller parameters were adjusted based on the Ziegler and Nichols step response method and refined experimentally. To improve the performance of the controller, conditional integration was adopted for windup elimination. Furthermore, a heuristic technique was implemented to decrease the convergence time. This technique consisted in modifying the control action for a short time interval when the tracking error was larger than a tolerance. The results showed that it was possible to guide the plate temperature around reference values. To do this, the control system changes the water level in the tank

in which the resistor is placed. This result indicates that it is also possible to control the interpass temperature in the real process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama esquemático de um sistema de manufatura aditiva com RAQI (SILVA et al., 2018).....	4
Figura 2.2: Foto do sistema de RAQI desenvolvido no LAPROSOLDA/FEMEC.	5
Figura 2.3: Esquema do protótipo desenvolvido.....	6
Figura 2. 4: Foto do protótipo desenvolvido.	6
Figura 2. 5: Sistema de processamento e controle.....	7
Figura 2. 6: Variação do ciclo ativo e do tempo em alto da onda quadrada.....	8
Figura 2. 7: Sistema de arrefecimento composto por serpentinas e células Peltier.....	9
Figura 2. 8: Foto dos componentes: conjunto resistência elétrica e chapa de alumínio, bomba hidráulica, Tanques B, C e F e válvula manual.	10
Figura 3.1: Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.....	11
Figura 3.2: Ilustração do windup do integrador. O diagrama mostra a saída do processo T , a referência T_{ref} , o sinal de controle u (ÅSTRÖM e HÄGGLUND, 1995).	12
Figura 3.3: Diagrama de blocos do controlador.	13
Figura 3.4: Caracterização da resposta ao degrau no método de ajuste de Ziegler e Nichols.....	14
Figura 4. 1: Curva da resposta ao degrau.	16
Figura 4. 2: Teste do controlador utilizando os parâmetros calculados pelo método de Ziegler e Nichols.	17
Figura 4. 3: Teste do controlador PI refinado experimentalmente.	18
Figura 4. 4: Teste do controlador para constatar o aquecimento da água do sistema. ...	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Parâmetros do controlador PID obtidos com o método da resposta ao degrau de Ziegler e Nichols (ÅSTRÖM e HÄNGGLUND,1995).....	15
--	----

LISTA DE ABREVIACÕES

FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
MF	Malha Fechada
PI	Proporcional-Integral
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RAQI	Resfriamento Ativo por Quase-Imersão
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
MADA	Manufatura Aditiva Por Deposição a Arco
WAAM	<i>Wire + Arc Additive Manufacturing</i>

Sumário

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA	4
CAPÍTULO 3 - DESCRIÇÃO DA LEI DE CONTROLE	11
3.1- Ajuste dos parâmetros do controlador a partir da resposta ao degrau	14
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	16
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....	19
REFERÊNCIAS	20
APÊNDICE A – INFORMAÇÕES ADICIONAIS SOBRE O PIRÔMETRO.....	22

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva de componentes metálicos baseada na deposição a arco (MADA - Manufatura Aditiva Por Deposição a Arco) tem como principal vantagem uma elevada taxa de deposição (entre 1 a 5 kg/h) (WILLIAMS et al., 2016). Contudo, existe um aporte térmico associado à técnica que pode levar a um acúmulo de calor caso o calor imposto não seja dissipado. O resfriamento natural pode mitigar o acúmulo de calor, porém implica tempos de deposição longos, o que pode acarretar em um aumento da largura da camada depositada ao longo da seção transversal e oxidação excessiva da peça produzida (YANG et al., 2017). Foram propostas na literatura diversas estratégias para reduzir o acúmulo de calor (LU et al., 2017; LEI et al., 2018; SILVA et al., 2020). Em particular, o Resfriamento Ativo por Quase-Imersão (RAQI), apresentado em Silva et al. (2020), gerou um bom desempenho em termos de eficiência e manutenção da produtividade. O RAQI foi desenvolvido na Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) ao longo de um trabalho de doutorado (patente depositada sob o registro BR10201801-53145 (REIS et al., 2017)).

A ideia fundamental do RAQI consiste em depositar a pré-forma em uma cuba na qual o nível de um líquido de arrefecimento (doravante considerado como sendo água) é mantido a uma distância fixa de seu topo. Assim, tem-se uma redução significativa do acúmulo de calor. Quanto mais próximo o nível de água estiver da camada de deposição, maior será o arrefecimento. Por outro lado, deve-se manter uma distância mínima para não prejudicar a qualidade da peça em termos de geometria e propriedades mecânicas. Em Silva et al. (2020), isso é realizado por meio de uma combinação entre chave boia e válvula solenoide. Mais precisamente, esse conjunto é empregado para manter o nível de água a uma distância fixa da camada de deposição. Considerando-se que a variável de interesse não é o nível de água na cuba e sim a temperatura de interpasse (T_i), pode-se interpretar que essa estratégia opera em malha aberta (MA), uma vez que a T_i não é considerada na determinação do fluxo de água que entra na cuba.

Sistemas de controle em MA possuem baixo custo de implementação se comparados a sistemas em malha fechada (MF), pois não se faz necessária a instalação de sensores para acompanhamento da saída de interesse. Isso também simplifica a implementação do

controlador. Por outro lado, o controle em MA é susceptível à distúrbios externos e a variações internas nos parâmetros do sistema (OGATA, 2003).

Para estender a funcionalidade do RAQI, poderia ser adotada uma estratégia de controle em malha fechada (MF). Em MF, a saída de interesse é realimentada e comparada com um valor de referência. O erro de rastreamento obtido é utilizado na determinação da entrada da planta. Então, tem-se a possibilidade controlar o sistema utilizando a variável de interesse no cálculo da variável manipulada. Isso pode proporcionar maior robustez em relação a distúrbios externos ou variações do sistema. No RAQI uma saída de interesse é a temperatura de interpasse, enquanto que o fluxo de entrada de líquido na cuba é a variável manipulada. Com a implementação do controle em MF, seria possível fazer com que a T_i seguisse valores de referência ao longo da deposição de material. Isso poderia uniformizar as propriedades mecânicas e a geometria da peça produzida, uma vez que tais características são definidas pelo histórico térmico ao longo da deposição.

Para projetar um controlador em MF tipicamente deve-se modelar matematicamente o sistema e, então, ajustar os parâmetros do controlador. Após concluídas essas etapas, o desempenho do sistema é avaliado por meio de simulações e/ou ensaios experimentais. É possível que seja necessário iterar o ajuste paramétrico e os testes no equipamento (SKOGESTAD e POSTLETHWAITE, 2007). No caso da MADA tais testes podem demandar um elevado dispêndio de tempo e dinheiro, a depender da geometria da peça fabricada. Com o intuito de reduzir o custo de projeto do controlador, optou-se por desenvolver um protótipo que possuísse as principais características do sistema real. Nesse desenvolvimento, os principais componentes do sistema de RAQI foram mantidos: Cuba de deposição, elementos para circulação de água e sensor de temperatura. Em particular a tocha de deposição, ou seja, a fonte de calor do sistema de manufatura aditiva, foi substituída por uma resistência elétrica. Para representar a pré-forma, foi fixada uma chapa de alumínio na resistência. Mais ainda, fixou-se a resistência em um tanque, que representa a cuba. Deste modo, alterando o nível de água no tanque em que a resistência foi fixada, foi possível variar a temperatura da chapa de alumínio. Esse efeito é similar à relação entre nível de água na cuba e temperatura de interpasse no sistema real. Para fazer com que a temperatura da chapa acompanhasse valores de referência fornecidos por um operador, adotou-se um controlador proporcional-integral (PI). A escolha desse controlador se justifica devido à simplicidade de implementação. Os parâmetros do controlador serão ajustados utilizando o método da curva de reação de Ziegler e Nichols (ÅSTRÖM e HÄNGGLUND, 1995).

Considerando as similaridades entre sistema real e protótipo, o presente trabalho proporcionará um conhecimento inicial dos desafios envolvidos no desenvolvimento de um controlador de temperatura de interpasse em um sistema de manufatura aditiva por deposição a arco com RAQI.

O restante desse trabalho está dividido como se segue. Nos Capítulos 2 e 3 apresentam-se o sistema real e o protótipo, como também a lei de controle desenvolvida. No Capítulo 4 são mostrados os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento da lei de controle. Todas as conclusões obtidas com esse trabalho são encontradas no Capítulo 5.

CAPÍTULO 2 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A Figura 2.1 mostra um diagrama esquemático de um sistema de manufatura aditiva com RAQI. O conjunto tocha e fonte de energia (indicados pelos itens G e L) é empregado para depositar a pré-forma (item A) dentro de uma cuba de construção (item C). Para resfriar a peça que está sendo confeccionada, a cuba é preenchida por um fluido de resfriamento (item B). Em particular, neste trabalho, considerar-se-á que a cuba é preenchida com água. O nível de fluido é mantido a uma distância H do topo da pré-forma utilizando um conjunto composto por uma válvula solenoide e sensor de nível (representado pelo item D). Como já mencionado, deve-se manter uma distância mínima entre o nível de água e o topo da pré-forma para não afetar a deposição do material.

O sistema empregado para bombear e filtrar o fluido de resfriamento é apontado pela letra I. A temperatura da pré-forma é monitorada por meio de um pirômetro (item J). Mais informações sobre esse equipamento encontram-se no Apêndice A. O procedimento de deposição é controlado utilizando o computador K.

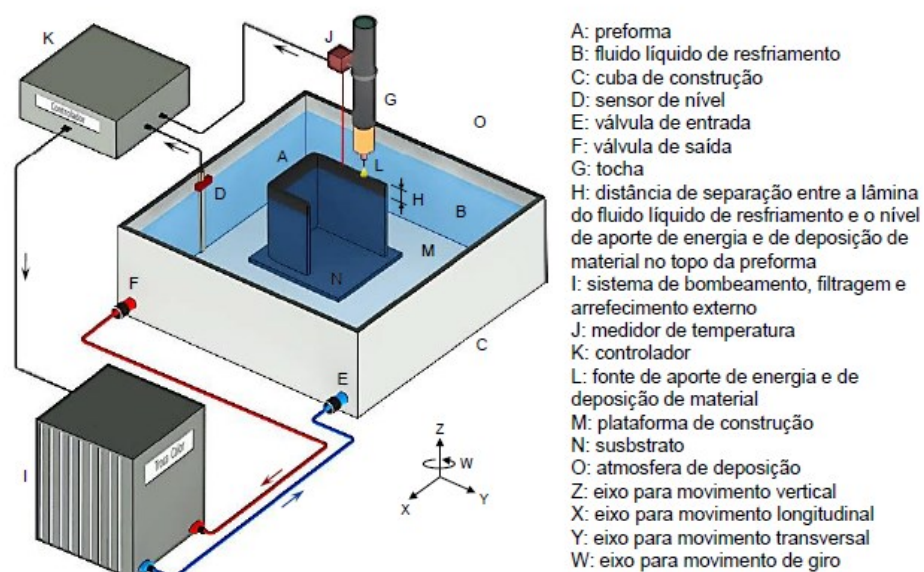


Figura 2.1: Diagrama esquemático de um sistema de manufatura aditiva com RAQI (SILVA et al., 2018).

Uma foto do sistema real é apresentada na Figura 2.2. Os itens indicados coincidem com a Figura 2.1.

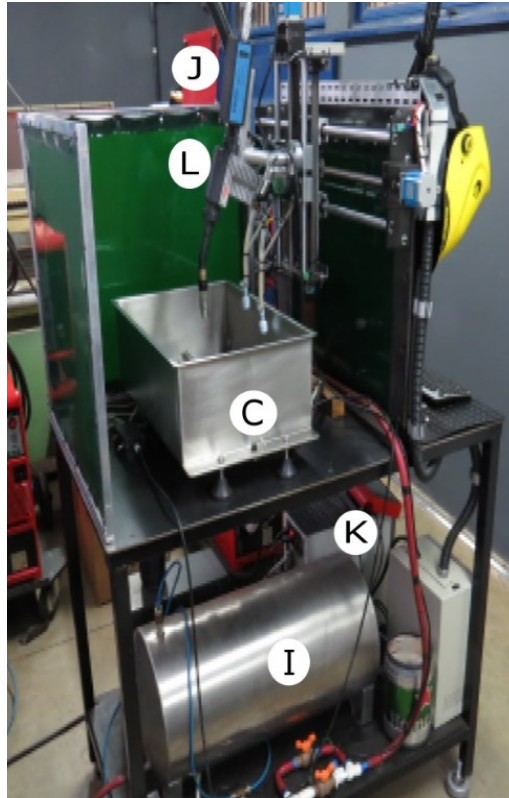


Figura 2.2: Foto do sistema de RAQI desenvolvido no LAPROSOLDA/FEMEC.

Deseja-se futuramente implementar um sistema de controle para rastrear referências para a temperatura da pré-forma por meio da variação do nível de água na cuba. Para diminuir os custos de desenvolvimento do controlador, construiu-se um protótipo ilustrado no diagrama esquemático do protótipo da Figura 2.3 e na Figura 2.4 é mostrado o protótipo finalizado.

O conjunto tocha e fonte de deposição, que fornece calor à pré-forma, foi substituído por uma resistência elétrica acoplada a chapa de alumínio. A resistência e a chapa estão destacadas na Figura 2.3 pelo item A. Esse conjunto foi posicionado no interior do Tanque B, que representa a cuba de construção. O sistema de bombeamento é constituído pelos Tanques C e F, bomba hidráulica (item G), e mangueiras de conexão. Foi instalada uma válvula manual (item E) para controlar o fluxo de água entre os Tanques C e F.

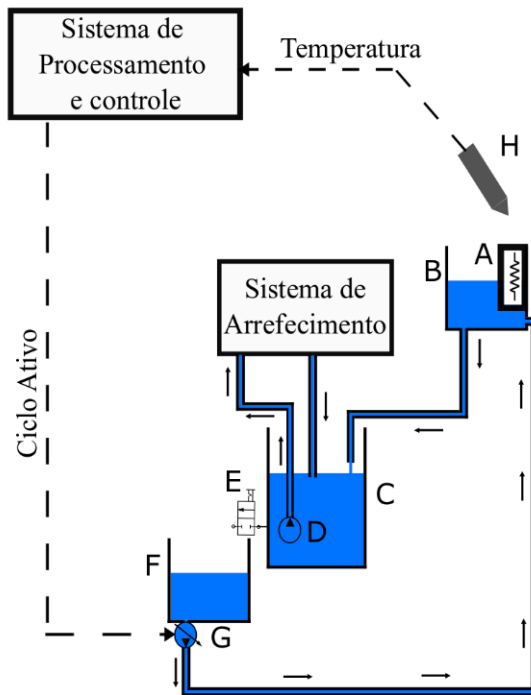


Figura 2.3: Esquema do protótipo desenvolvido.



Figura 2. 4: Foto do protótipo desenvolvido.

A implementação do sistema de controle foi realizada no Arduino UNO mostrado na Figura 2.5. Isso envolveu o desenvolvimento de software para leitura e filtragem de dados, cálculo da ação de controle e manipulação do fluxo de água entre os tanques F e B. Tal

manipulação é realizada variando-se o ciclo ativo do sinal PWM (*Pulse Width Modulation*). A modulação PWM consiste em manipular o tempo em nível lógico em alto de uma onda quadrada o que é denominado ciclo ativo (RASHID,1999). Essa técnica é ilustrada na Figura 2.6. Utilizando-se um sinal PWM é possível manipular a tensão média aplicada à bomba e, conseqüentemente, variar o fluxo de entrada no Tanque B.

Vale comentar que o pirômetro, por padrão, fornece um sinal de 4-20~mA linearmente proporcional à temperatura da pré-forma. Tal sinal é convertido para 0-5~V e, então, é fornecido ao Arduino utilizando o CI XY-IT0V. Também cabe salientar que o sensor de temperatura usado neste trabalho é o mesmo utilizado no sistema real.

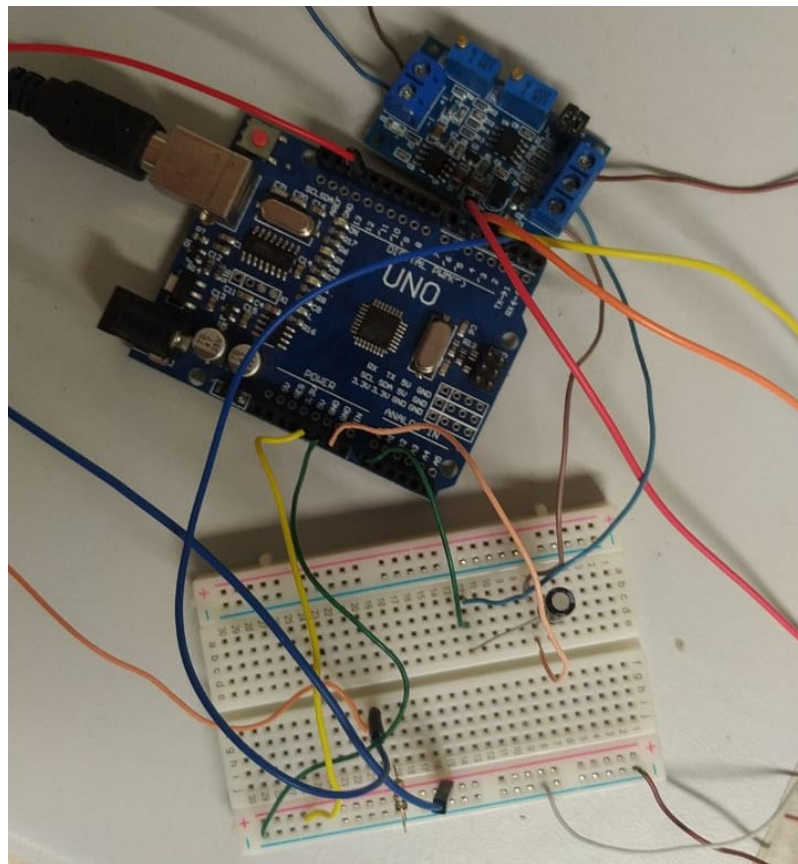


Figura 2. 5: Sistema de processamento e controle.

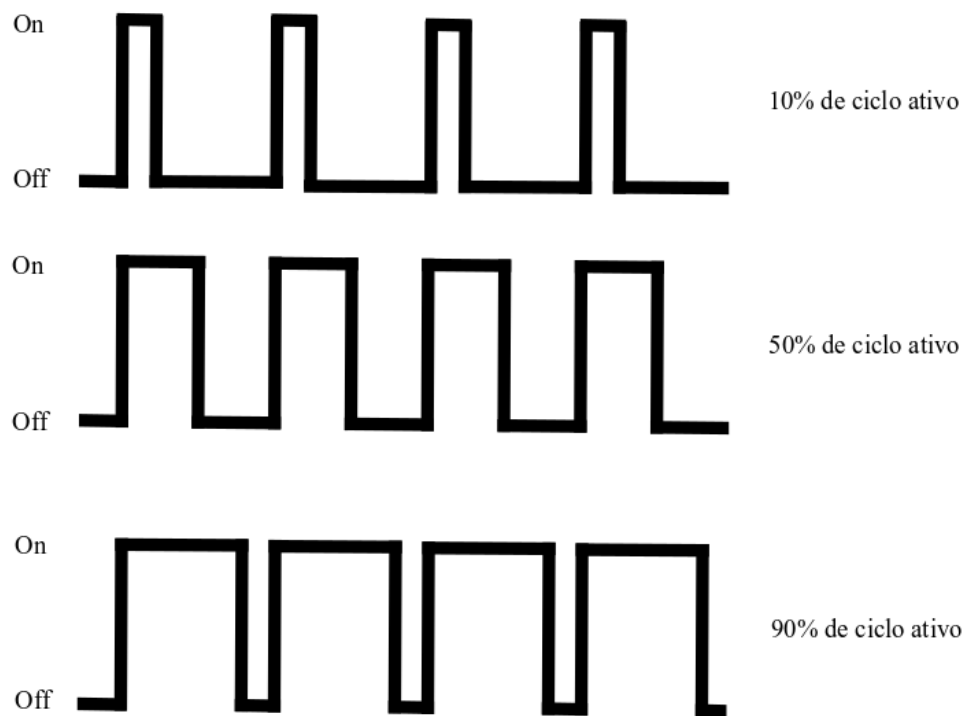


Figura 2. 6: Variação do ciclo ativo e do tempo em alto da onda quadrada.

O sistema de arrefecimento indicado na Figura 2.3 é composto por um conjunto de cinco serpentinas acopladas a células de efeito Peltier (vide Figura 2.7), isto é, uma célula constituída por dois condutores diferentes que, ao ser percorrida por uma corrente elétrica, produz um gradiente de temperatura. Como resultado, tem-se uma face fria e outra quente (CAMPOS et al., 2010). Neste trabalho, utilizou-se o lado frio para refrigerar a água proveniente do tanque C, enquanto o calor da face quente foi retirado por meio de um conjunto ventilador e aleta. Optou-se por utilizar essas células devido ao custo relativamente baixo, além de fácil montagem e tamanho reduzido. Note que no sistema real não há necessidade de resfriamento, pois tipicamente o volume total de água é grande o suficiente para que não seja perdida a capacidade de resfriamento. Entretanto, no protótipo, esse fenômeno rapidamente ocorre na ausência do sistema de arrefecimento, impossibilitando a realização dos testes.

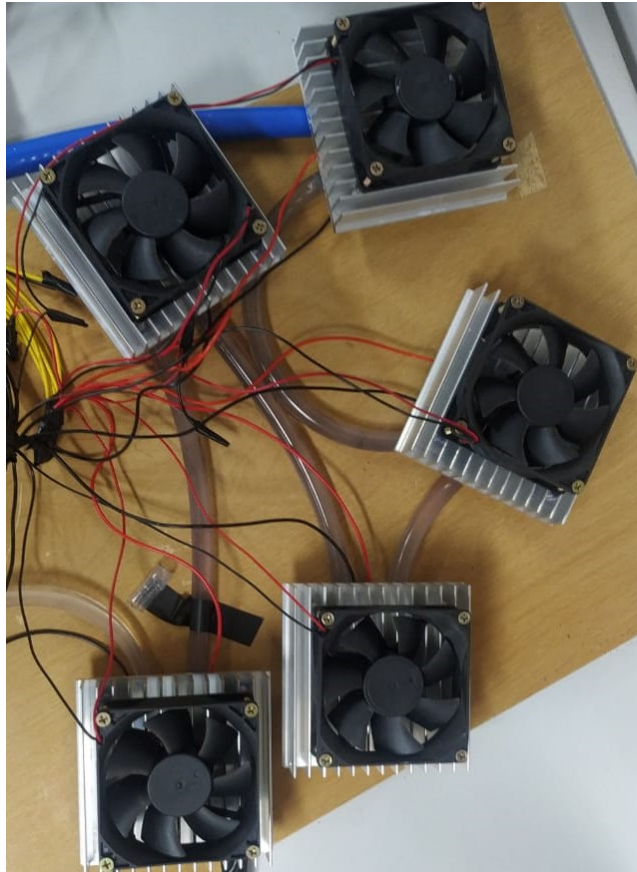


Figura 2. 7: Sistema de arrefecimento composto por serpentinas e células Peltier.

Vale comentar que foram avaliadas diferentes configurações para instalação do sistema de arrefecimento. Primeiramente colocou-se o sistema entre os Tanques B e C, contudo essa alternativa causava perda de carga, dificultando o controle de temperatura. Outra posição testada foi entre os Tanques F e B, porém a água não permanecia tempo suficiente nas serpentinas para o arrefecimento. Por fim, colocou-se o sistema em paralelo no Tanque C e foi adicionado uma bomba ao protótipo para realizar a recirculação de água. Essa última configuração proporcionou melhores resultados em termos de arrefecimento da água do sistema.

Na Figura 2.8, é mostrada uma foto mais detalhada dos componentes do protótipo, no qual os itens indicados por letras seguem a mesma sequência da Figura 2.3.

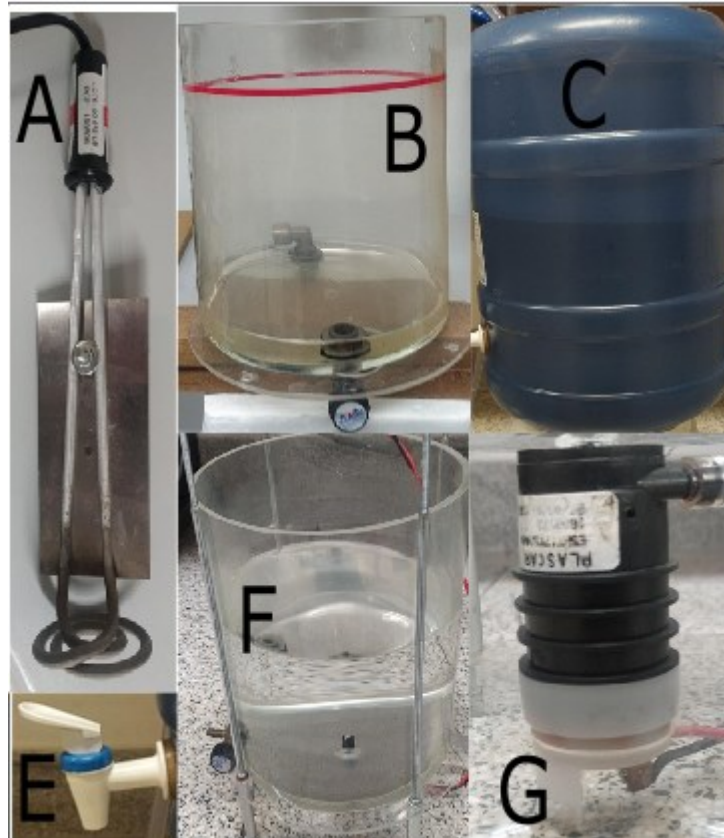


Figura 2. 8: Foto dos componentes: conjunto resistência elétrica e chapa de alumínio (A), Tanques B, C e F e válvula manual (E), bomba hidráulica (G).

CAPÍTULO 3 - DESCRIÇÃO DA LEI DE CONTROLE

Para controlar a temperatura da placa de alumínio, adotou-se uma estrutura de controle em malha fechada (MF). Nessa estrutura, a saída do processo é realimentada e comparada com a referência gerando um erro de rastreamento. O erro é utilizado para calcular a entrada da planta por meio de uma lei de controle ou, simplesmente, controlador. A adoção de um sistema em MF permite estabilizar sistemas naturalmente instáveis e reduzir efeitos de incertezas de modelo e de variações no processo (SKOGESTAD e POSTLETHWAITE, 2007). Na Figura 3.1 é mostrado um diagrama de blocos de um sistema em MF.

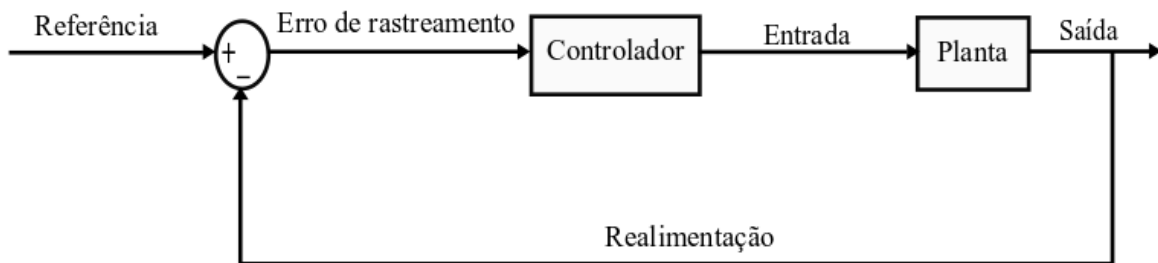


Figura 3.1: Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.

No protótipo a saída do processo é a temperatura medida (T_M) da chapa de alumínio. A tarefa de controle consiste em fazer com que tal temperatura siga valores de referência, denotados por T_{ref} . Com esse propósito, manipula-se o ciclo ativo de um sinal PWM de acordo com a ação de controle calculada e, conseqüentemente, altera-se o nível de água no Tanque B. A porcentagem de ciclo ativo será doravante representada por u . Vale comentar que, devido à presença de ruídos de medida significativos, foi necessário adicionar um filtro passa-baixas no sinal de realimentação. Os dados filtrados serão denotados como T_f . No Capítulo 4 o projeto de tal filtro é detalhado.

Para realizar o controle do sistema, escolheu-se um controlador proporcional-integral (PI). Esse controlador foi adotado devido à simplicidade de projeto e implementação (OGATA, 2010). Por outro lado, a adoção de ação integral pode resultar em *windup*. Esse fenômeno é resultante da combinação entre o termo integrativo e a saturação da entrada da planta. Mais especificamente, quando a saturação ocorre o sistema opera em malha aberta, pois a entrada permanece constante independentemente da saída. Todavia, o erro continua sendo integrado e a ação integral pode atingir valores elevados. Para que a entrada retorne a valores próximos do

regime estacionário, o erro deve assumir um sinal diferente do inicial por intervalos longos de tempo de modo que a integral retorne a valores razoáveis. Isso resulta em elevados sobressinais e tempos de acomodação. A Figura 3.2 ilustra o problema do *windup* (ÅSTRÖM e HÅGGLUND, 1995).

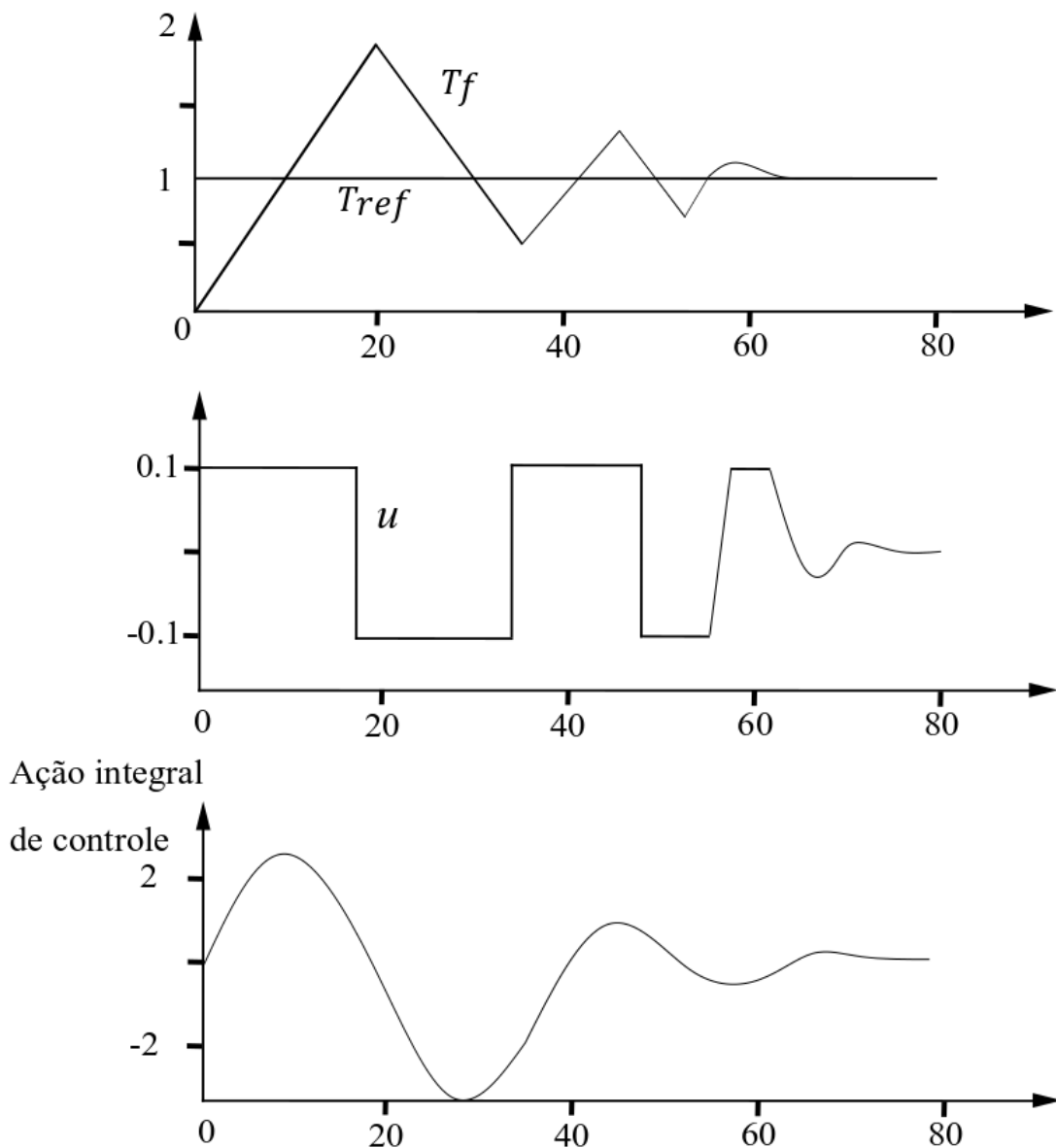


Figura 3.2: Ilustração do *windup* do integrador. O diagrama mostra a saída do processo T , a referência T_{ref} , o sinal de controle u (ÅSTRÖM e HÅGGLUND, 1995).

Com o intuito de resolver esse problema, foram testadas algumas técnicas de anti-*windup*, como *back-calculation* e integração condicional. Neste trabalho, essa última gerou melhores resultados. A ideia fundamental da integração condicional consistiu em desligar a

ação integral quando a ação de controle satura. A detecção da saturação é realizada comparando-se a ação de controle calculada w com a entrada real do sistema u . Uma comparação entre diferentes técnicas de anti-*windup* pode ser encontrada em Li, Park e Shin (2011).

Vale comentar que a parte inferior da resistência elétrica deve estar sempre submersa em água para evitar um superaquecimento. Além disso, deve-se evitar que a água transborde do Tanque B. Essas limitações estão associadas a restrições inferior e superior em u dadas por 46,50% e 57,00% respectivamente. Tais valores foram determinados experimentalmente variando-se u até a estabilização do nível de água nos limiares inferior e superior.

Na Figura 3.1 é mostrado um diagrama de blocos da estrutura de controle com o filtro passa-baixas. Os símbolos k_p e k_i representam os ganhos proporcional e integral do controlador, respectivamente. Comparando as Figuras 3.1 e 3.3, é possível notar que o sinal da realimentação na Figura 3.3 é positivo. Isso se deve ao fato de que o ganho da planta é negativo, isto é, quanto mais água no Tanque B, menor a temperatura do conjunto resistência elétrica e chapa de alumínio.

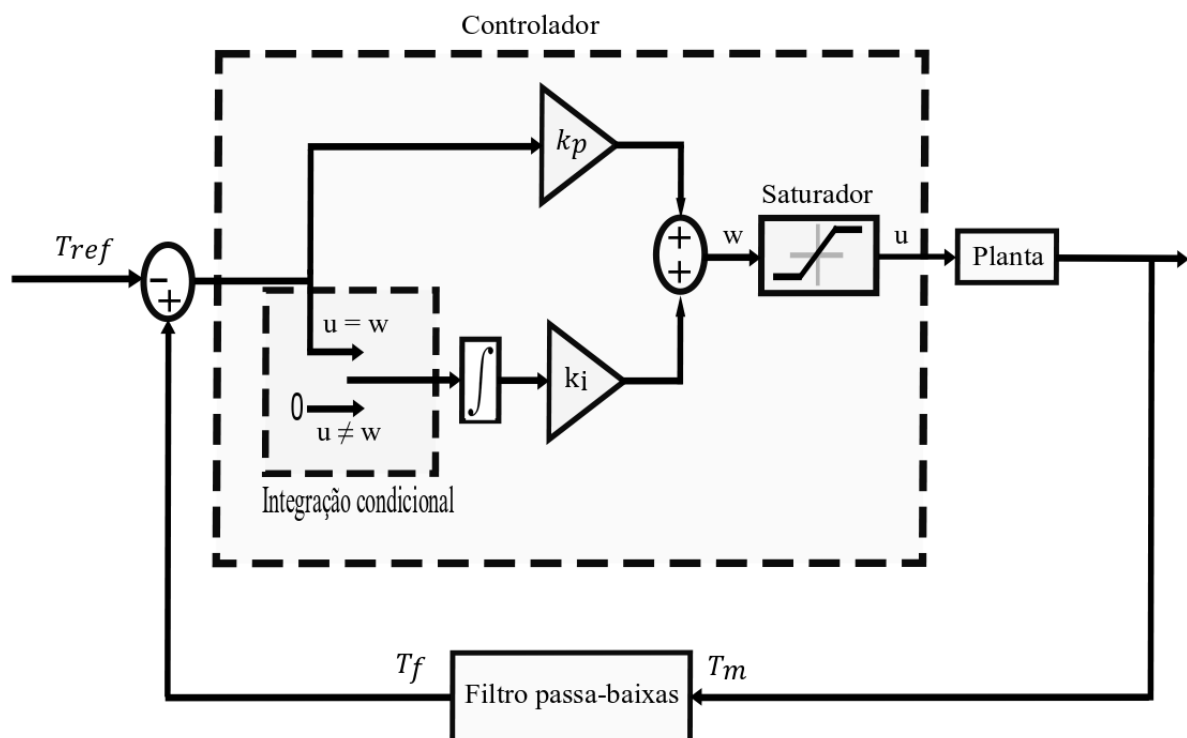


Figura 3.3: Diagrama de blocos do controlador.

Uma das vantagens de se adotar um controlador PI é a possibilidade de se ajustar os parâmetros k_p e k_i baseando-se apenas em dados experimentais. Por exemplo, métodos baseados em otimização nos quais é possível ajustar os parâmetros do controlador de maneira que a resposta do sistema real seja a mais próxima possível da resposta de um modelo de referência (HEMERLY, 2000). Alternativamente, pode-se projetar o controlador com base na resposta ao degrau. Essa técnica é descrita na sequência.

3.1- Ajuste dos parâmetros do controlador a partir da resposta ao degrau

O controlador foi projetado utilizando o método da curva de reação de Ziegler e Nichols. Nesse método, com o sistema em malha aberta, é aplicado um degrau na entrada da planta e avalia-se o comportamento da saída. Caso o sistema for estável e a resposta da planta for similar à mostrada na Figura 3.4, é possível identificar os parâmetros L , K e T , representando o atraso da resposta, o ganho estático e a constante de tempo respectivamente (ÅSTRÖM e HÄGGLUND, 1995).

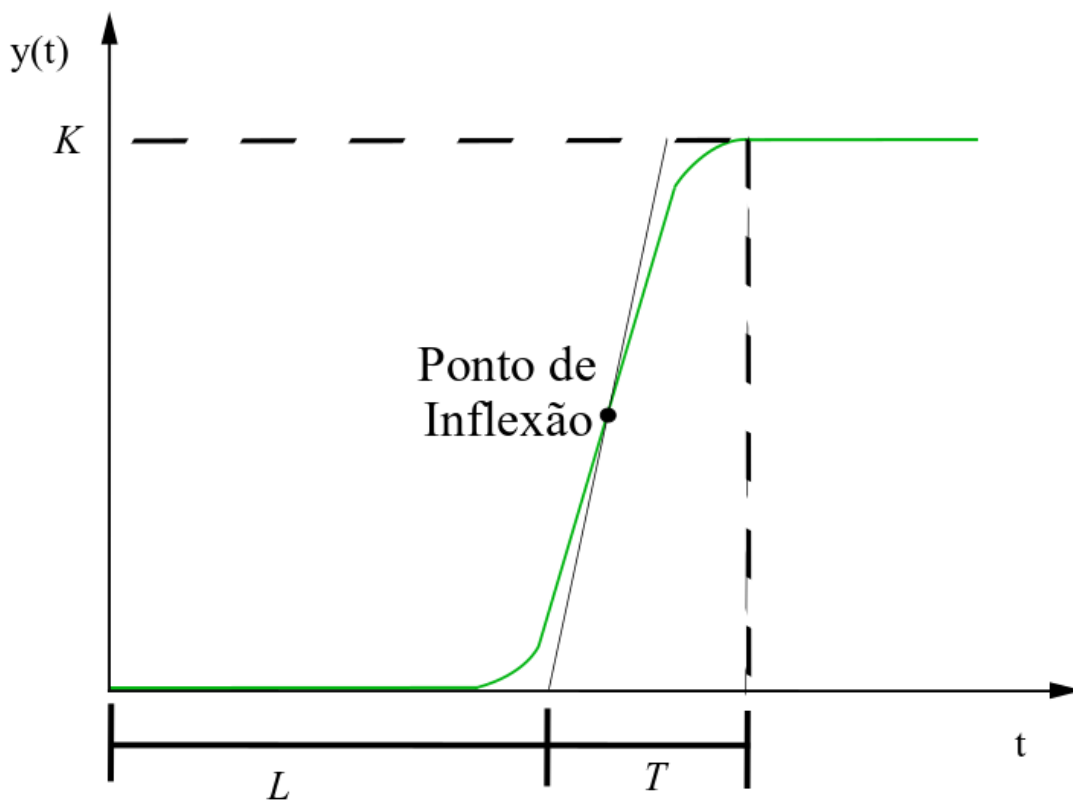


Figura 3.4: Caracterização da resposta ao degrau no método de ajuste de Ziegler e Nichols.

Existem diferentes tabelas de ajuste de parâmetros de PID a partir dos parâmetros K , L e T , por exemplo, as tabelas Cohen-Coon, Wang-Juang-Chan e o conhecido método de Ziegler e Nichols (JOSEPH e OLAIYA, 2018). Neste trabalho, optou-se por adotar esse último devido à sua fácil aplicação. A Tabela 3.1 mostra como são ajustados os parâmetros de controladores P, PI e PID de acordo com o método de Ziegler e Nichols. Mais especificamente, mostra-se como ajustar o ganho proporcional (k_p), o tempo integral (T_i) e o tempo derivativo (T_d) em função de L e T . Vale ressaltar que tipicamente é necessário refinar experimentalmente os parâmetros obtidos.

Tabela 3.1: Parâmetros do controlador PID obtidos com o método da resposta ao degrau de Ziegler e Nichols (ÅSTRÖM e HÄNGGLUND,1995).

Tipo de Controlador	k_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{kL}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{kL}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{kL}$	$2L$	$0,5L$

Cabe salientar que a partir de T_i , calcula-se o ganho integral fazendo-se $k_i = 1/T_i$.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para ajuste do controlador por meio da resposta ao degrau, foi escolhida uma temperatura de trabalho de 80 °C. Esse valor representa uma temperatura típica de operação do sistema de manufatura aditiva. Nesse cenário, nos testes para rastreamento de referências, a temperatura inicial (e a de referência) deve ser inicialmente 80 °C. A excursão de referência será em torno desse valor inicial de, por exemplo, entre 60 a 90 °C. O controlador foi implementado com um período de amostragem de 0,5 s. A escolha desse período foi realizada de acordo com a taxa de atualização do sensor e com tempo de resposta do sistema. Como discutido no Capítulo 3, adotou-se um ciclo ativo mínimo de 46,50% para que a resistência elétrica não superaquecesse e máximo de 57% para que o líquido no Tanque B não transbordasse. Também foi necessária a implementação de um filtro Butterworth passa-baixas de terceira ordem e com frequência de corte de 0,25 Hz.

A Figura 4.1 mostra a resposta ao degrau do sistema para uma entrada de 6% acima do valor inicial de 49%. É possível observar que a resposta da planta se assemelha à mostrada na Figura 3.4, com um ganho negativo. Cabe lembrar que tal ganho está associado a uma relação inversamente proporcional entre entrada e saída do processo. Além disso, é possível visualizar uma comparação entre T_m e T_f . Verifica-se que a introdução do filtro reduziu significativamente o efeito de ruídos de medida, sem a introdução de atrasos.

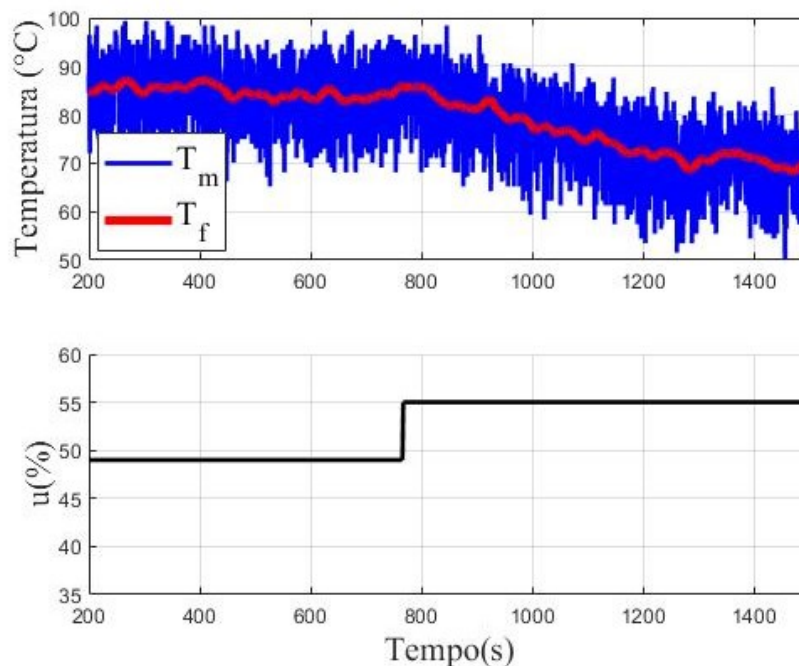


Figura 4. 1: Curva da resposta ao degrau.

Observando a Figura 4.1, é possível determinar o ganho e a constante de tempo. Em particular, determinam-se $K = -12,09$, $L = 35$ e $\tau = 502$. Então, o ganho K_p e o termo integral T_i foram ajustados conforme a Tabela 3.1, obtendo-se $K_p = 1,0677$ e $T_i = 116,7$.

Após a escolha da T_{REF} e do ajuste dos parâmetros, foi realizado um teste para avaliar o desempenho do controlador projetado. O resultado desse teste é mostrado na Figura 4.3.

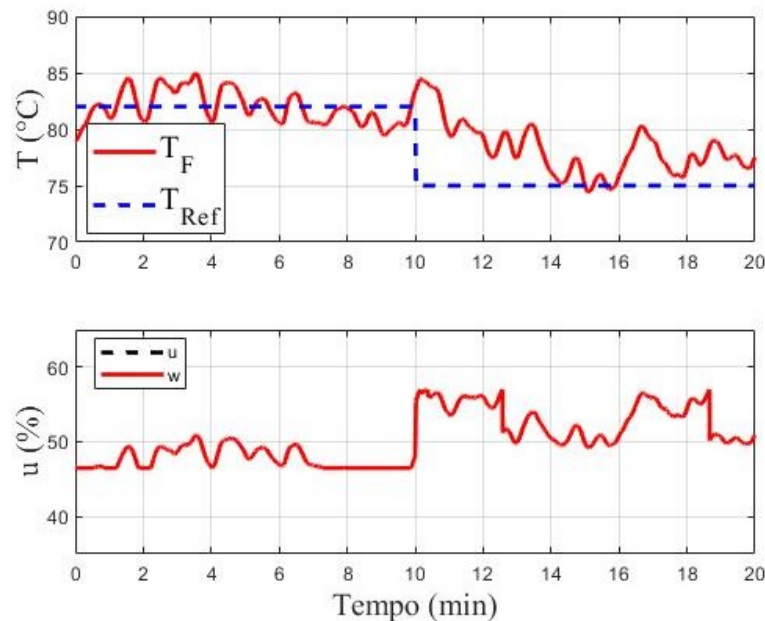


Figura 4. 2: Teste do controlador utilizando os parâmetros calculados pelo método de Ziegler e Nichols.

Observando a Figura 4.2 é possível notar que, embora o controlador consiga guiar a temperatura do sistema para o em torno da temperatura de referência, existe um grande erro em regime. Além disso, é possível atribuir as oscilações existentes à fatores externos ao processo, por exemplo, a abertura e fechamento da válvula manual e ao ruído de medida. Portanto, realizou-se um refinamento dos ganhos iniciais por meio de tentativa e erro. Esse reajuste foi realizado experimentalmente. Os valores finais foram $K_p = 3,044$ e $T_i = 104,493$. Na Figura 4.3 é mostrado o resultado experimental com o controlador PI refinado, no qual foi adotado uma temperatura inicial de $82\text{ }^\circ\text{C}$. Nota-se que houve uma diminuição considerável no erro em regime e também uma maior velocidade de convergência para a temperatura de referência. Contudo, ainda é possível notar a presença das oscilações causadas por fatores externos. Além disso, nota-se que com o passar do tempo, a temperatura começa a divergir da referência, isso se deve a incapacidade do sistema de arrefecimento em manter a água em temperatura ambiente. Mais à frente será apresentado um teste de desempenho do sistema.

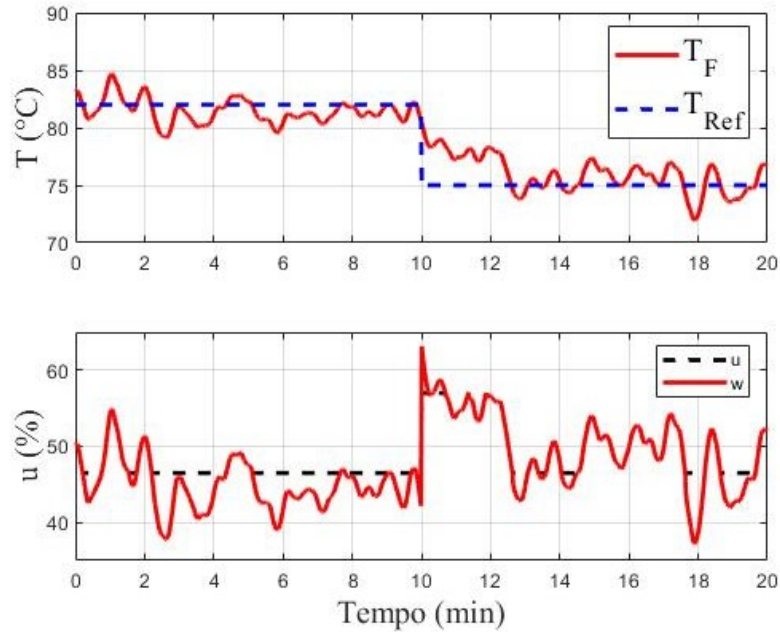


Figura 4. 3: Teste do controlador PI refinado experimentalmente.

Por fim, foi realizado um teste de desempenho para o sistema inicialmente desligado, isto é, para a chapa em temperatura ambiente. O resultado obtido é mostrado na Figura 4.4. Pode-se verificar que após cerca de 8 minutos, a saída é mantida em torno da referência até por volta de 15 minutos, quando a temperatura volta a aumentar novamente. Isso acontece, pois, a temperatura da água aumenta ao longo do ensaio uma vez que o sistema de arrefecimento não consegue retirar todo o calor introduzido pela resistência. Para resolver esse problema, é necessário melhorar a capacidade de arrefecimento do sistema, por exemplo, adicionando-se mais células Peltier. Todavia, como o aquecimento da água não é observado no processo real, isso não foi realizado no presente trabalho.

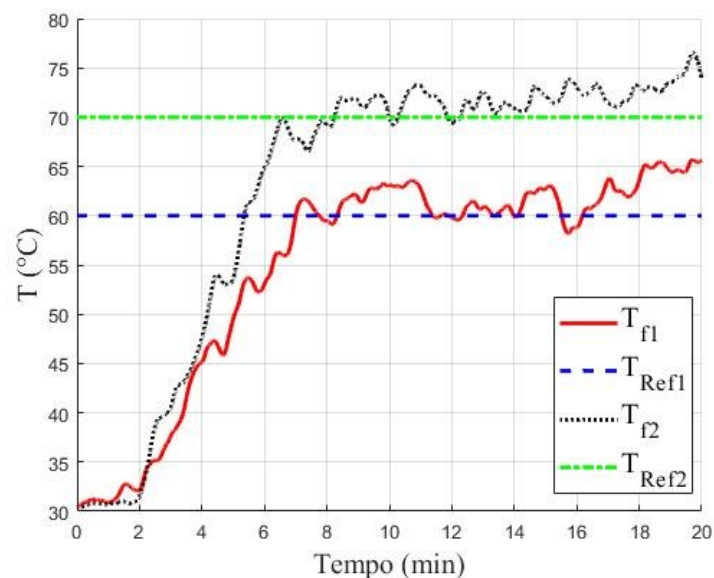


Figura 4. 4: Teste do controlador para constatar o aquecimento da água do sistema.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Com o intuito de futuramente desenvolver um controlador para a temperatura de interpasse em um sistema de manufatura aditiva com RAQI, foi desenvolvido um protótipo para simular as principais características do sistema real. Em particular, a tocha de deposição e a fonte de energia foram substituídos por uma resistência elétrica e chapa de alumínio. O Tanque B foi empregado para representar a cuba, e os tanques C e F e a bomba hidráulica G funcionam como o sistema de bombeamento externo do sistema principal. O Arduino UNO realiza o mesmo trabalho do computador do sistema original. Implementou-se um controlador do tipo PI para rastrear valores de referência para a temperatura da chapa de alumínio. Os parâmetros do controlador foram ajustados por meio do método da resposta ao degrau. Mais ainda, a integração condicional foi empregada para eliminar o *windup*. Como resultado, foi possível guiar a temperatura da chapa de alumínio, que representa a temperatura de interpasse, para o entorno de valores de referência. Isso indica que um controlador similar pode ser empregado no sistema de MADA com RAQI.

Foram observadas oscilações na temperatura da peça que podem ser atribuídas à fatores externos ao processo, como o ruído de medida e a regulação de água no tanque F por meio da válvula manual E. Uma possível estratégia para reduzir as oscilações relacionadas com a abertura da válvula consiste em também controlar o nível de água nos tanques. No entanto, isso requer a instalação de sensores de nível no processo. A informação do nível de água no tanque F possibilitaria ainda aumentar a faixa de excursão para a entrada de controle. Contudo, como no processo real não há sensores de nível, tal estratégia não foi adotada nesse trabalho.

Trabalhos futuros podem empregar a malha de controle proposta no sistema real para controlar a temperatura de interpasse. Isso pode trazer vantagens na fabricação de peças, por exemplo, na deposição de diferentes tipos de metais, ou nas características físicas das peças. Além disso, pode-se investigar as vantagens da inserção de sensores de nível para melhorar o desempenho da malha de controle.

REFERÊNCIAS

LI, X. L.; PARK, J. G.; SHIN, H. B. Comparison and evaluation of anti-windup PI controllers. **Journal of Power Electronics**, Korea, v. 11, n. 1, p. 45-50, 2011. DOI: 10.6113/JPE.2011.11.1.045.

HEMERLY, E. M. **Controle por Computador de Sistemas Dinâmicos**. 2a ed. São Paulo: Blucher, 2000.

LEI, Y.; XIONG, J.; LI, R. Effect of inter layer idle time on thermal behavior for multilayer single-pass thin-walled parts in gmaw-based additive manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, n. 1-4, p. 1355–1365, 2018. DOI: 10.1007/s00170-018-1699-1.

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. São Paulo: Makron Books, 1999.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

SILVA, L. J.; SOUZA, D. M.; ARAÚJO, D. B.; SAAD, N. S.; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Gerenciamento térmico via resfriamento ativo por quase-imersão aplicado a manufatura aditiva por fusão-deposição a arco. **In Congresso Nacional de Soldagem**, 44, 2018, Uberlândia, **Anais eletrônicos [...]** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

SKOGESTAD, S.; POSTLETHWAITE, I. **Multivariable feedback control: analysis and design**. New York: Wiley, 2007.

LU, X.; ZHOU, Y.; XING, X. L.; SHAO, L. Y.; YANG, Q. X.; GAO, S. Y. Open-source wire and arc additive manufacturing system: Formability, microstructures, and mechanical properties. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 93, n. 5-8, p. 2145–2154, 2017. DOI: 10.1007/s00170-017-0636-z.

ÅSTRÖM, K. J.; HÅNGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. 2 ed. EUA: Isa, 1995.

JOSEPH, E. E.; OLAIYA, O. O. Cohen-Coon. PID Tuning Method: A Better Option to Ziegler Nichols-Pid Tuning Method. **Computer Engineering and Intelligent Systems**, v. 9, n. 5, p. 33-37, 2018.

CAMPOS, A.; FARIAS, A.; FERNANDES, J.; BRAZ, A.; MACHADO, L.; PIMENTEL, Edfranklin; Refrigeração Utilizando Pastilhas De Efeito Peltier, **HOLOS**, RN, v. 2, 2010. DOI:10.15628/holos.2010.383. 2010.

REIS, R. P.; SCOTTI, A.; e SILVA, L. J. **Técnica de resfriamento ativo para manufatura aditiva**. Patente Pendente, BR1020180153145: Instituto Nacional da Propriedade Industrial, 2018.

SILVA, L. J.; REIS, REIS, R. P.; SCOTTI, A. The Potential of IR Pyrometry for Monitoring Interpass Temperature in Wire + Arc Additive Manufacturing. **Evolutions Mech Eng**.3(1), v. 3, 2019. EME.000553.2019. DOI: 10.31031/EME.2019.03.000553.

YANG, D.; WANG, G.; ZHANG, G. Thermal analysis for single-pass multi-layer gmaw based additive manufacturing using infrared thermography. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 244, p. 215–224, 2017. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.01.024.

WILLIAMS, S. W.; MARTINA, F.; ADDISON, A.; COLEGROVE, P.; DING, J.; PARDAL, G. Wire + arc additive manufacturing. **Materials Science and Technology**, v. 32, n. 7, p. 641–647, 2015. DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073.

APÊNDICE A – INFORMAÇÕES ADICIONAIS SOBRE O PIRÔMETRO

Como discutido em Silva et al. (2019), o pirômetro é uma ótima ferramenta para se medir a temperatura de interpasse. Esse equipamento possui boa resolução espacial por medir em um pequeno ponto da peça, facilitando a análise dos dados recolhidos. Sendo assim, o pirômetro se mostra uma forma adequada para monitorar a temperatura em um processo MADA. O pirômetro (Figura A.1) utilizado neste trabalho possui tensão de alimentação de 24 V, e existem duas opções para o range de leitura, a primeira é de 30 – 1000 °C e a segunda é 50 – 1300 °C. Neste trabalho utilizou-se a primeira configuração do range. Cabe destacar, que para que a leitura da temperatura seja realizada de forma adequada é necessário que o sensor esteja aproximadamente a 37 cm do objeto.



Figura A.1: Pirômetro MI-PE 140 com infravermelho, fabricado pela empresa Mikron.