

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DIGITAL DE CONTROLE DE TEMPERATURA  
PARA APARELHO DE BANHO-MARIA LABORATORIAL

por

Marcos Ruschel Roehe

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho de 2011

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DIGITAL DE CONTROLE DE TEMPERATURA  
PARA APARELHO DE BANHO-MARIA LABORATORIAL

por

Marcos Ruschel Roehe

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Eduardo A. Perondi

Comissão de Avaliação:

Prof. Flavio José Lorini

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho

Prof. Rafael Antonio Comparsi Laranja

Porto Alegre, 17 de Junho de 2011.

ROEHE, M. R. **Controlador Eletrônico de Temperatura para Aparelho de Banho-maria Laboratorial**. 2011. 20. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

## **RESUMO**

Este trabalho trata do projeto de um controlador de temperatura digital para aplicação como substituto dos sistemas analógicos tradicionais. Foram analisadas as características dos sistemas atuais, seus problemas e imprecisões e a partir destes, foram definidos os requisitos para o desenvolvimento de um sistema novo. Foi realizada uma modelagem matemática do sistema a ser controlado e proposto um controlador PID. Este controlador foi testado por simulações e, posteriormente, implementado em um sistema experimental. O controlador foi então calibrado com o apoio de simulações e sua funcionalidade foi comprovada através de diversos experimentos com variadas configurações e parâmetros. Por fim, foi feita uma estimativa de custo para determinar a viabilidade econômica do projeto.

**PALAVRAS-CHAVE:** sistemas de controle de temperatura, PID, termostato, banho-maria

ROEHE, M. R. **Electronic Temperature Controller for Laboratory Water Bath**. 2011. 20. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

## **ABSTRACT**

This work reports the project of a digital temperature controller developed for the substitution of the traditional analogue systems. The properties of the available systems, their problems and inaccuracies were analyzed and, based on these topics, requirements were set for the development of a new system. A mathematical model of the system to be controlled was created and a PID controller was proposed. This controller was tested in simulations and later implemented in an experimental system. The controller was then calibrated with aid of simulations and its functionality was confirmed through several experiments with different settings and parameters. Finally, it was made a cost estimate to determine the economic viability of the project.

**KEYWORDS:** Temperature control systems, PID, thermostat, waterbath

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Descrição do trabalho .....	1
1.2. Motivação .....	1
1.3. Objetivos.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
2.1. Uso do banho-maria em laboratórios de processos biológicos.....	1
2.2. Estado da arte.....	2
2.3. Estratégias de controle .....	3
2.3.1. Controlador PID .....	3
2.4. Cálculos numéricos.....	4
2.4.1. Integração pelo método trapezoidal.....	4
2.4.2. Derivação pelo método trapezoidal com filtragem de primeira ordem.....	5
3. MODELAGEM DO SISTEMA FÍSICO .....	5
3.1. Equacionamento do sistema térmico .....	5
4. DESENVOLVIMENTO DO HARDWARE PARA O SISTEMA DE CONTROLE.....	7
4.1. Parâmetros de projeto .....	7
4.1.1. Faixa de temperatura de trabalho .....	7
4.1.2. Potência de aquecimento máxima .....	8
4.2. Definição dos componentes do sistema.....	8
4.2.1. Fonte de potência calorífica.....	8
4.2.2. Sensor de temperatura .....	9
4.2.3. Interface com o usuário .....	9
4.2.4. Microprocessador .....	9
4.2.5. Comunicação com computador .....	10
4.3. Criação de um protótipo para testes.....	10
5. IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS DO SISTEMA .....	10
5.1. Atraso de transporte .....	11
5.2. Constante de tempo.....	11
5.3. Resistência térmica equivalente.....	11
5.4. Modelo com os parâmetros identificados .....	12
6. PROJETO DO CONTROLADOR.....	12
6.1. Escolha da estratégia de controle.....	12
6.2. Diagrama de blocos em malha fechada .....	12
6.3. Desenvolvimento do software para o microprocessador .....	13
6.4. Ajuste dos ganhos do controlador.....	13
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	14
7.1. Verificação experimental.....	14

8. CONCLUSÕES.....	16
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	17
ANEXO I - Controle de duas posições .....	18
APÊNDICE I – Tabela de comparação entre candidatos para o variador de fornecimento de potência calorífica .....	19
APÊNDICE II – Comparação entre os tipos de sensores de temperatura disponíveis .....	20
APÊNDICE III – Ilustrações.....	21
APÊNDICE IV - Algoritmo de cálculo dos ganhos do controlador PID.....	22

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Descrição do trabalho**

Este trabalho trata do projeto de um sistema de controle para um aparelho de banho-maria de uso laboratorial, levando em conta a maioria das necessidades e detalhes dos processos em que o aparelho é utilizado. Inicialmente é feita uma revisão bibliográfica onde é descrito o processo mais comumente realizado no aparelho, bem como as consequências do uso de aparelhos de baixa qualidade de controle, e posteriormente abordado o estado da arte dos equipamentos atuais, discutindo-se como estes podem ser melhorados. É feita uma descrição dos tipos de controle e métodos de cálculo que foram utilizados no projeto e são definidos os objetivos e a metodologia, bem como as etapas da realização do projeto. Os resultados simulados são comparados com os experimentais e as conclusões a respeito do trabalho são discutidas.

### **1.2. Motivação**

O Laboratório de Virologia da UFRGS possui 15 aparelhos de banho-maria analógicos com alta incerteza. Por questões orçamentárias, o laboratório não dispõe de condições para adquirir aparelhos com baixa incerteza. Assim, os resultados dos experimentos são prejudicados e, em muitos casos, devem ser repetidos devido a problemas causados pela inadequação dos equipamentos.

Segundo os profissionais atuantes no laboratório, a disponibilidade de aparelhos com sistemas de controle de precisão semelhante ou melhor do que a sensibilidade dos processos realizados, e com custo acessível, resolveria a maioria dos problemas encontrados nos experimentos realizados. Como ponto de partida, foram analisados os aparelhos de banho-maria presentes no laboratório e chegou-se à conclusão de que a substituição dos termostatos analógicos por sistemas de controle de alta qualidade traria os resultados desejados, o que motivou o desenvolvimento do projeto tema deste trabalho.

É importante mencionar que o sistema foi desenvolvido de forma que possa ser utilizado posteriormente em diversas outras aplicações, bastando apenas alterar alguns parâmetros e componentes. Assim, apesar de o aparelho de banho-maria ser o foco deste trabalho, o sistema desenvolvido não é necessariamente limitado a este uso.

### **1.3. Objetivos**

Este trabalho objetivou o projeto de um sistema de controle capaz de regular a temperatura dos aparelhos de banho-maria com a menor variação possível ao longo do tempo, atingindo a estabilização da temperatura em um tempo semelhante ou menor do que o sistema de controle original. Também é necessário que o aparelho possa enviar dados de operação para um sistema de monitoramento por computador, para, desta forma, adequar o laboratório à norma ISO17025. Esta norma exige que laboratórios possuam um registro de funcionamento de todos os aparelhos utilizados. Um indicador da temperatura da água também é desejável, pois em sistemas analógicos se faz necessário o uso de termômetros.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Uso do banho-maria em laboratórios de processos biológicos**

O banho-maria é um equipamento que consiste de em um recipiente com um volume de fluido (geralmente água) que deve ser mantido a uma temperatura aproximadamente constante, definida pelo processo a ser realizado.

Para garantir a qualidade dos resultados, é necessário que o sistema de controle opere de forma que o fluido permaneça na temperatura desejada com a menor variação possível, de modo a não ultrapassar os limites de sensibilidade do processo realizado. Isto pode ser realizado de diversas maneiras e a qualidade e complexidade do sistema geralmente determinam o preço final do produto, que é um fator decisivo na escolha por parte dos responsáveis nos laboratórios. Estes, em muitos casos, não possuem conhecimento técnico a respeito de sistemas de controle e da forma como a temperatura varia ao longo do tempo nos aparelhos utilizados.

## 2.2. Estado da arte

Existem diferentes tipos de aparelhos de banho-maria disponíveis no mercado. Sistemas simples operam por termostato mecânico com histerese, ligando e desligando o fornecimento de calor quando a temperatura atinge um limite superior ou inferior, que é geralmente regulado por um controle analógico. Sistemas intermediários operam eletronicamente com regulagem e controle digitais, reduzindo a histerese e problemas por desgaste mecânico, mas mantendo as características típicas do termostato (liga-desliga ou 'bang-bang'). Estes dois tipos de sistema produzem uma variação contínua da temperatura conforme o fornecimento de calor é ligado e desligado. Estas variações podem chegar a  $\pm 2^\circ\text{C}$  e estes aparelhos são utilizados em processos que podem ter sensibilidade inferior a  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . Como consequência desta variação, alguns processos têm sua velocidade reduzida, em outros há desperdício de material, muitas vezes de custo elevado e, em alguns casos, os experimentos são invalidados. A Figura 2.1 mostra a resposta de um sistema com controle de duas posições (liga-desliga) a um salto de referência para  $37^\circ\text{C}$ , onde pode ser visto que a temperatura apresenta uma variação contínua ao longo do tempo. Este teste foi realizado utilizando o aparelho De Leo com um controlador digital do tipo duas posições (liga/desliga) da marca *Full Gauge*, modelo TIC-17C.

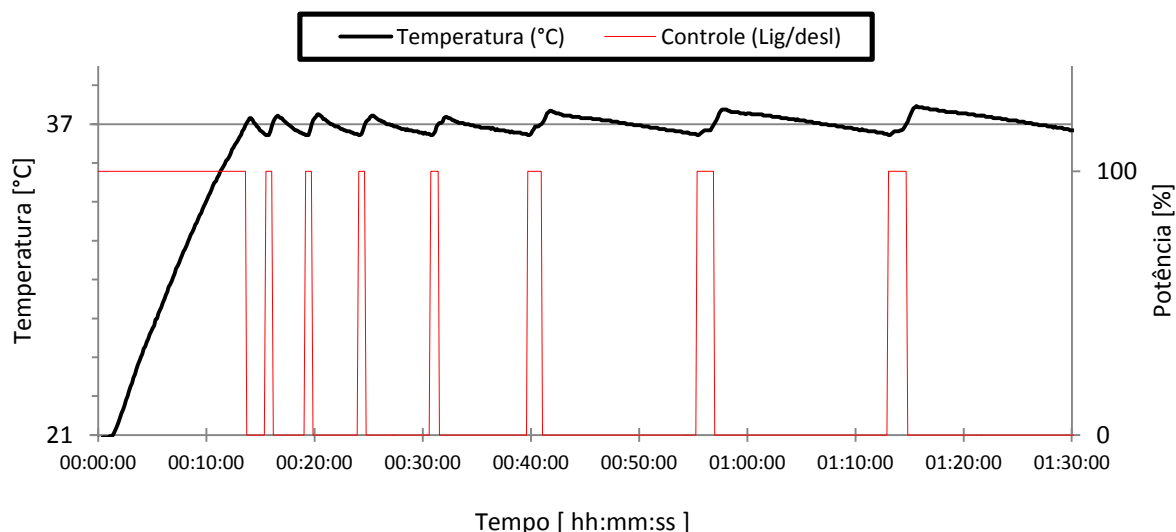


Figura 2.1 – Resposta de um sistema com controle de duas posições (liga-desliga)

Dois exemplos de aparelhos de banho-maria são apresentados na Figura 2.2. O aparelho “tipo termostato” é analógico com termostato mecânico, o aparelho digital utiliza controle tipo PID (Proporcional, Integral e Derivativo).





**GV**  
 Controle: termostato mecânico  
 Faixa: 10 a 100°C  
 Estabilidade:  $\pm 2^\circ\text{C}$   
 Potência: 1500W  
 Preço: R\$ 1067,00



**Stern 6**  
 Controle: PID digital  
 Faixa: 0 a 60°C  
 Estabilidade:  $\pm 0.5^\circ\text{C}$   
 Potência: 600W  
 Preço: R\$ 5300

(a) Aparelho analógico do tipo termostato

(b) Aparelho digital com controle PID

Figura 2.2 – Exemplos de aparelhos disponíveis comercialmente no mercado  
 (Fonte: Grupo GV; Seiger)

Os sistemas mais modernos controlam o fornecimento de calor de forma variável, baseando-se em modelos matemáticos que levam em conta não somente a temperatura medida em um determinado momento, mas também o comportamento da temperatura ao longo do tempo através de componentes integradores e derivadores. Assim, é possível obter respostas rápidas com pequenas variações de temperatura. Como desvantagem, os sistemas disponíveis comercialmente apresentam custo elevado, o que inviabiliza o seu uso em grande parte dos aparelhos. Um controlador de temperatura universal do tipo liga-desliga custa aproximadamente R\$ 100,00. Já um controlador de temperatura universal do tipo PID custa geralmente mais do que R\$ 400,00.

## 2.3. Estratégias de controle

Controladores são dispositivos que comparam o valor medido na saída do processo com o valor desejado, determinam o erro e produzem o sinal de controle que deverá reduzir o desvio a um valor nulo ou muito pequeno. O tipo de controlador utilizado neste trabalho é o controlador PID. O tipo de controlador *bang-bang* (ou liga/desliga) está detalhado no Anexo I.

### 2.3.1. Controlador PID

Conforme descrito por Perondi, 2009 o controle PID une as características das três ações básicas de controle (proporcional, integral e derivativa), portanto a sua resposta é rápida e imune a perturbações no sistema.

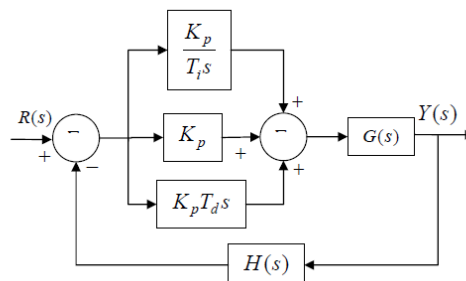


Figura 2.3 - Sistema com controle PID. (Fonte: Perondi, 2009)

A função que define o comportamento de um controlador PID pode ser dada por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + K_p K_i \int e(t) dt \quad (2.1)$$

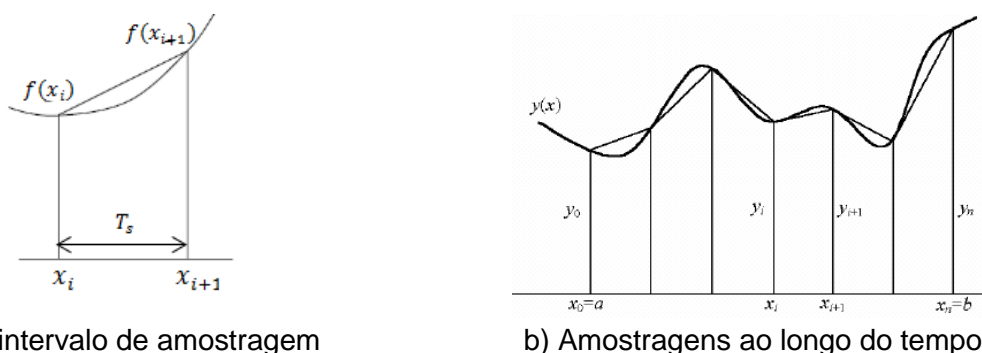
Onde  $u(t)$  é variável de controle,  $e(t)$  é o erro do sinal com relação à referência,  $K_p$  é o ganho proporcional,  $T_d$  é o ganho derivativo e  $K_i$  é o ganho da ação de controle integral.

## 2.4. Cálculos numéricos

Para utilizar os conceitos matemáticos de integração e derivação em um sistema real, é necessário que estes sejam discretizados utilizando métodos de cálculo numérico. Na literatura existem diversos métodos para discretização e cada método produz resultados ligeiramente diferentes. Os métodos utilizados neste trabalho estão detalhados nos próximos capítulos.

### 2.4.1. Integração pelo método trapezoidal

O método trapezoidal - também conhecido como aproximação de Tustin ou transformação bilinear - conforme Borche, 2008, divide o intervalo de integração em subintervalos de comprimento igual ao período de amostragem. A função é aproximada, em cada período de amostragem, por um polinômio de grau 1. Este método é ilustrado na Figura 2.4.



a) Um intervalo de amostragem

b) Amostragens ao longo do tempo

Figura 2.4 – Ilustração da integração numérica pelo método trapezoidal. (Fonte Borche, 2008)

Sendo a integral definida:

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x) dx \quad (2.2)$$

(Onde  $x_i$  é o tempo da amostragem anterior,  $x_{i+1}$  é o tempo da amostragem atual e  $f(x)$  é a função a ser integrada), cujo resultado é igual à área sob a curva  $f(x)$  no intervalo de  $x_i$  a  $x_{i+1}$ , sua aproximação numérica é dada pela área sob o polinômio de grau 1 que liga os pontos C e D. Desta forma, o valor da integral pode ser aproximado pela equação:

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x) dx \approx T_s \left( \frac{f(x_i) + f(x_{i+1})}{2} \right) \quad (2.3)$$

Onde  $T_s$  é o tempo de amostragem,  $f(x_i)$  é o valor da amostragem anterior e  $f(x_{i+1})$  é o valor da amostragem atual.

### 2.4.2. Derivação pelo método trapezoidal com filtragem de primeira ordem

De modo semelhante à integração pelo método trapezoidal, a derivação trapezoidal - também conhecida como aproximação de Tustin ou diferenças centradas - é aproximada, em cada período de amostragem, por um polinômio de grau 1. Este método é ilustrado na Figura 2.5.

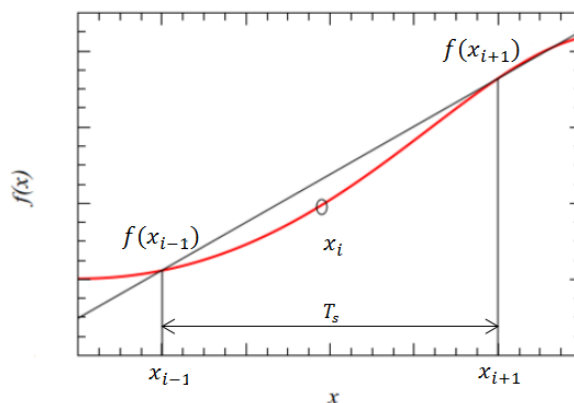


Figura 2.5 – Ilustração da derivação numérica pelo método trapezoidal (fonte IF - UFRGS)

A derivada  $f'(x)$  da função  $f(x)$  no ponto  $x_i$  pode ser aproximada por:

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2T_s} \quad (2.4)$$

Onde  $f(x_{i-1})$  é valor da amostragem anterior,  $f(x_i)$  é o valor da amostragem atual,  $f(x_{i+1})$  é o valor da amostragem seguinte e  $f(x)$  é a função a ser derivada.

Conforme descrito por Bazanella e Silva Jr., 2005, para evitar problemas com ruídos de alta frequência, que seriam amplificados em demasia por uma ação derivativa pura, deve-se adicionar um filtro para limitar o ganho desta ação em altas frequências.

A derivação pelo Método trapezoidal com filtragem de primeira ordem é definida como:

$$f'(x_i) \approx \frac{(2 - NT_s)f'(x_{i-1})}{(2 + NT_s)} + \frac{2N}{(2 + NT)} [f(x_i) - f(x_{i-1})] \quad (2.5)$$

Onde N é a constante de tempo do filtro de primeira ordem.

## 3. MODELAGEM DO SISTEMA FÍSICO

### 3.1. Equacionamento do sistema térmico

O equipamento utilizado para o projeto é o banho maria de marca DeLeo, e a sua parte interna é mostrada na Figura 3.1.



Figura 3.1– Ilustração da resistência de aquecimento e sensor de temperatura

Para a modelagem do sistema foi necessário obter a sua função de transferência, que relaciona a temperatura da água com a potência fornecida. Primeiramente, foi feito um balanço energético segundo a primeira lei da termodinâmica. O calor que entra no volume de controle é gerado pela dissipação de potência elétrica na resistência de aquecimento. O calor que sai do volume de controle é o calor perdido para o ambiente por convecção (simplificado por através do uso de uma resistência térmica equivalente) e o calor acumulado no volume de controle é dada por uma capacitância térmica. Aplicando a 1ª Lei da Termodinâmica para um regime transitório, foi definida a equação do sistema como sendo:

$$\frac{dQ}{dt} = C \frac{d\theta}{dt} = P - \frac{1}{R_T} \theta \quad (3.1)$$

$$\text{Sendo } \theta = T_{\text{água}} - T_{\text{ambiente}}$$

onde  $Q$  é a energia térmica acumulada,  $C$  é a capacitância térmica do sistema,  $R_t$  é a resistência térmica do sistema,  $P$  é a potência elétrica fornecida e  $\theta$  é o diferencial de temperatura aplicado. Neste equacionamento foram desprezados os efeitos de radiação, por tratar-se de um sistema que opera em baixas temperaturas onde a radiação não produz uma quantidade significativa de perda de calor.

Aplicando a transformada de Laplace na equação (3.1) foi encontrada a razão entre a variação na temperatura  $\theta(S)$  e a potência aplicada  $P(S)$  (função de transferência do sistema).

$$\frac{\theta(S)}{P(S)} = \frac{R_T}{Ts + 1} \quad (3.2)$$

onde  $T$  e  $R_T$  são a constante de tempo e resistência térmica equivalente do sistema físico a ser controlado.

Idealmente, a resposta do sensor a uma variação (média) de temperatura seria instantânea, porém, em sistemas reais existe atraso no transporte do calor fornecido até o sensor de temperatura. O atraso de transporte é definido como o tempo que o sensor leva até “sentir” a variação de fornecimento de potência calorífica, ilustrado na Figura 3.2.

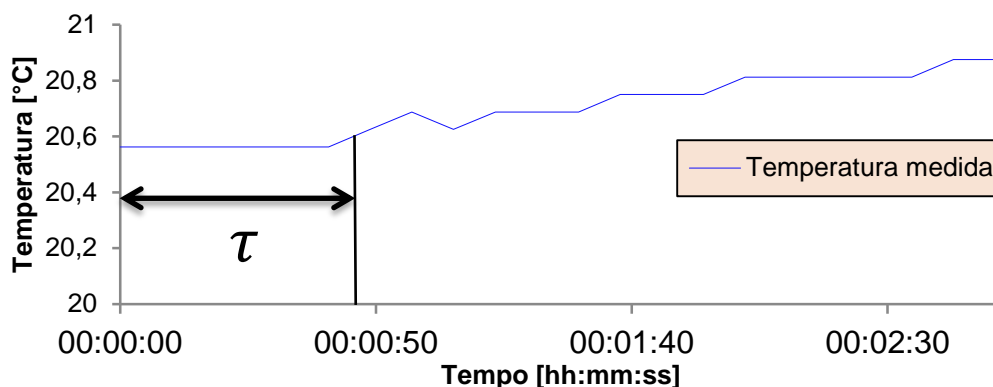


Figura 3.2 – Exemplo de atraso de transporte

A este atraso foi aplicada a transformada de Laplace e o resultado foi adicionado à função de transferência, reescrita como:

$$\frac{\theta(S)}{P(S)} = e^{-\tau s} \frac{R_T}{T_S + 1} \quad (3.3)$$

onde  $\tau$  é o atraso de transporte, em segundos.

## 4. DESENVOLVIMENTO DO HARDWARE PARA O SISTEMA DE CONTROLE

Para projetar o sistema é necessário que os seus componentes sejam definidos e caracterizados. Cada componente foi analisado e escolhido para atender aos objetivos deste trabalho.

Para o correto dimensionamento e escolha dos componentes, alguns parâmetros de projeto foram identificados.

### 4.1. Parâmetros de projeto

#### 4.1.1. Faixa de temperatura de trabalho

É necessário definir a faixa de temperatura desejada para o dimensionamento e escolha dos subsistemas do banho-maria. Como o fluido de trabalho usado é a água, que pode ser aquecida até 100°C antes da evaporação nas CNTP, esta foi definida como sendo a temperatura máxima de operação. Como o sistema não possui resfriamento, a temperatura mínima de operação é sempre a temperatura ambiente, e por se tratar de um aparelho de uso em ambientes fechados, a temperatura mínima de operação foi definida como 5°C.

O desvio máximo da temperatura deve ser de  $\pm 1^\circ\text{C}$ , pois esta é a sensibilidade máxima dos processos utilizados no laboratório de Virologia da UFRGS.

#### 4.1.2. Potência de aquecimento máxima

A maioria dos aparelhos comerciais utiliza resistências elétricas para o fornecimento de potência calorífica. A potência varia de 100 W em aparelhos pequenos até 2000 W em aparelhos grandes. O objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um sistema de controle de temperatura. Assim os subsistemas devem ser dimensionados para que possam controlar uma boa faixa de potências de aquecimento. Esta faixa foi definida tendo como máximo uma potência de aquecimento de 1000 W ligadas em uma tensão de rede de 127 V<sub>RMS</sub> ou 220 V<sub>RMS</sub>. Para cálculo de tensão de pico é utilizado 220 V<sub>RMS</sub>, e para cálculo de corrente de pico é utilizado 127 V.

### 4.2. Definição dos componentes do sistema

#### 4.2.1. Fonte de potência calorífica

O sistema de controle desenvolvido deverá ser aplicado a aparelhos nos quais o fornecimento de potência calorífica se dá por resistência elétrica, que por sua vez pode ser alimentada por corrente contínua (CC) ou por corrente alternada (CA). É necessário conhecer a tensão de pico da rede de 220 V<sub>RMS</sub> para o dimensionamento dos componentes. Esta tensão de pico é dada pela equação (4.1).

$$E_{pico} = E_{RMS}\sqrt{2} = 220\sqrt{2} = 311 V \quad (4.1)$$

onde  $E_{pico}$  é a tensão de pico e  $E_{RMS}$  é a tensão RMS.

A máxima corrente instantânea é definida pela razão entre a tensão de pico de uma rede de 127V, que resulta em 180 V, e a potência máxima do aquecedor, de 1000 W e, como resultado, foi obtido:

$$I_{pico} = \frac{P}{E_{pico}}\sqrt{2} = \frac{1000 W}{127 V}\sqrt{2} = 11,1 A \quad (4.2)$$

onde  $I$  é a corrente máxima de operação e  $P$  é a potência máxima de aquecimento.

Com estes dados foi feita uma busca de componentes eletrônicos disponíveis no mercado, na qual alguns parâmetros dos componentes foram comparados para que fosse escolhido o que melhor atendesse às necessidades do projeto, ao menor custo. Os dados de todos os componentes estão disponíveis nas suas *datasheets* ( International Rectifier, 2000; Philips Semiconductors, 1997; ST, 1998). O APÊNDICE I mostra os parâmetros de comparação e os componentes escolhidos para avaliação.

O componente BT139 ( Philips Semiconductors, 1997) opera com CA, o que elimina a necessidade de uma ponte retificadora, e também apresenta a menor potência dissipada – o que se traduz em economia de energia e necessidade de um dissipador de calor menor - e a disponibilidade a um custo baixo. Como este componente suporta a tensão e corrente calculados com uma boa margem de segurança, foi o componente escolhido para controlar a potência calorífica fornecida.

A variação da potência de aquecimento será feita através do uso ou bloqueio cada meia-onda da corrente de 60 Hz da rede elétrica, em um número total de comprimentos de onda que será ajustado durante o projeto para atender aos requisitos de resolução do sistema. Como a resposta do sistema é lenta, pode-se utilizar com um número elevado de comprimentos de onda por ciclo, garantindo uma boa resolução ao aquecedor. A Figura 4.1 mostra um exemplo com 10 comprimentos de onda onde 7,5 ondas (25%) são bloqueadas. Neste caso, a potência calorífica utilizada é de 75% da potência máxima.

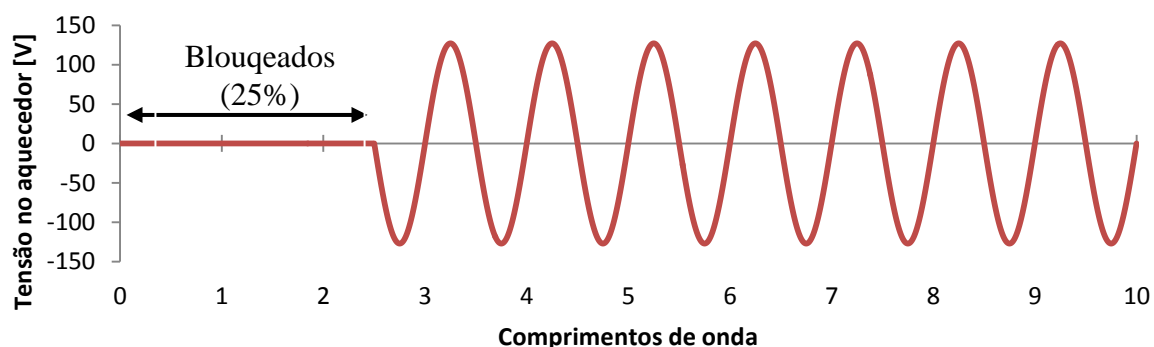


Figura 4.1 - Exemplo de fornecimento de potência a 75%

O algoritmo de controle calcula qual a porcentagem de potência necessária e utiliza um número proporcional de comprimentos de onda, bloqueando o restante. Isto ocorre uma vez em cada ciclo de potência de forma contínua.

#### 4.2.2. Sensor de temperatura

Para a leitura da temperatura é desejável que o sensor possua comportamento aproximadamente linear na faixa de interesse - eliminando a necessidade de uma curva de calibração ou tabelas de memória - e uma boa precisão dentro da faixa de utilização, sendo capaz de ler temperaturas com resolução melhor que a sensibilidade dos processos realizados no banho-maria. Também é desejável que o sensor seja pouco afetado por ruídos, evitando a necessidade de filtros. Diversos tipos de sensores de temperatura foram analisados e estão descritos no APÊNDICE II. Foi escolhido o DS18B20 (Maxim, 2008), que, segundo sua *datasheet*, possui desvio de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  até  $85^{\circ}\text{C}$ , resolução de  $0,0625^{\circ}\text{C}$ , baixo custo e saída de dados em formato digital com comunicação por apenas um cabo, o que torna o sistema aproximadamente imune a ruídos de medição. As suas características e modo de funcionamento estão detalhados na sua *datasheet* (Maxim, 2008).

#### 4.2.3. Interface com o usuário

Para a saída de dados para o usuário, pode ser usado um display LCD (*Liquid Crystal Display*) ou um display de 7 segmentos de 3 algarismos. O display de 7 segmentos pode mostrar até 3 números ou letras e requer o uso de um decodificador para cada letra. O display LCD possui 2 linhas com 16 caracteres cada, podendo mostrar diversas informações simultaneamente de maneira detalhada, dispensando o uso de decodificador pois este é programado via software. As vantagens do display LCD compensam o seu custo superior e, portanto, foi a forma de saída de dados escolhida para o projeto.

#### 4.2.4. Microprocessador

Para a escolha do microprocessador foram levados em conta o tamanho, número de pinos de entrada e saída, disponibilidade de memória de código e o custo. Os microprocessadores PIC do fabricante Microchip foram escolhidos por ser facilmente encontrado no mercado a um baixo custo em relação a outros fabricantes, além da simplicidade de uso. Dentre os modelos disponíveis foi escolhido o PIC16F648, que possui 16 pinos de entrada e saída, oscilador interno de 4 MHz, 3 relógios internos e comunicação serial

por *hardware*, características que reduzem o número de componentes externos e também a complexidade do *software* a ser programado. As suas características e modo de funcionamento estão detalhados na sua *datasheet* ( Microchip, 2004).

#### 4.2.5. Comunicação com computador

Para a comunicação com um computador foi escolhido o protocolo serial RS-232, pois o microprocessador utilizado possui os algoritmos de comunicação já programados via hardware, eliminando a necessidade de código extra. É necessário converter o sinal de saída de 5 volts do microprocessador em um sinal compatível com o RS-232, e para isto foi usado o componente MAX232, do fabricante Maxim. As suas características e modo de funcionamento estão detalhados na sua *datasheet* ( Maxim, 2003).

A visualização dos dados no computador se dá por uso de um terminal de comunicação, que exibe todas as informações enviadas pelo controlador em tela, e pode salvá-las em um arquivo no disco rígido.

#### 4.3. Criação de um protótipo para testes

Com todos os subsistemas escolhidos, foi criado um protótipo em uma placa de protótipos (proto-board). Esta placa não é ideal para testes, pois devido à sua construção, é muito susceptível a interferências eletromagnéticas que podem levar a erros. Como o sistema projetado não utiliza de sinais analógicos e o ambiente de testes é um ambiente com pouca interferência, este fator não gerou problemas significativos.

### 5. IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS DO SISTEMA

Para a obtenção dos parâmetros físicos do sistema é necessário conhecer a curva de variação da temperatura ao longo do tempo para uma determinada potência. Para tanto, foi aplicado ao sistema - inicialmente em temperatura ambiente - um salto de potência de 100% (que neste aparelho são 150 W), e foi observado que para esta potência a temperatura de ebulição é alcançada. Com isso, efeitos como turbulências e a própria mudança de fase do líquido dificultam a obtenção da constante de tempo do sistema. Então, visando determinar adequadamente a constante de tempo, as curvas de resposta do sistema foram obtidas para variadas potências de aquecimento. Foi observado que a resposta do sistema não é linear. Isto se deve a fatores, não previstos no modelo, que se acentuam com o aumento da temperatura, tais como a ebulição local da água, perda de calor por radiação, aumento do coeficiente de convecção entre a resistência de aquecimento e a água, entre outros. Como consequência, conforme a potência de aquecimento é aumentada, a constante de tempo se reduz significativamente. A faixa de temperatura mais utilizada neste aparelho fica próxima dos 40°C, então foi tomada a curva de 10% de potência como base para a modelagem, pois, com esta potência, a temperatura final se estabilizou próximo a 40°C. Na Figura 5.1 estão apresentados os dados obtidos com esta situação sobrepostos aos de simulação através do modelo, conforme descrito a seguir.



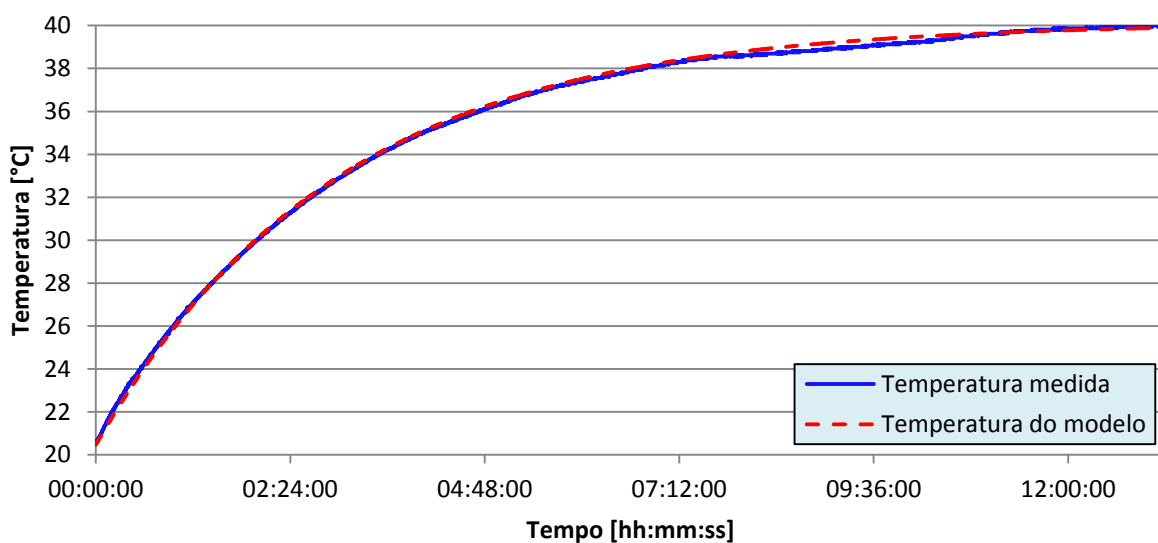


Figura 5.1- Resposta do sistema a um salto de 10% de potência

Como pode ser verificado através da curva da Figura 5.1, o sistema é bastante lento, o que dificultou a aquisição das curvas de resposta.

### 5.1. Atraso de transporte

O atraso de transporte é o tempo que a temperatura medida pelo sensor leva para poder observar a variação provocada pelo fornecimento de potência calorífica. Este tempo foi avaliado através de experimentos e foi definido como:

$$\tau = 50 \text{ s} \quad (5.1)$$

### 5.2. Constante de tempo

A constante de tempo do sistema é definida como o tempo que este leva para atingir 63,2% do ganho de temperatura. Como a temperatura inicial foi de 20,56°C, e a final foi de 40,12°C, o aumento de temperatura foi de 19,56°C. Somados os 20,56°C a 63% de 19,56°C, foi obtida a temperatura de 32,93°C. Esta temperatura foi atingida em 2 horas e 59 minutos, o que equivale a 10734 segundos. Desta temperatura foi subtraído o atraso de transporte e foi obtida a seguinte constante de tempo:

$$T = 10684 \text{ s} \quad (5.2)$$

É importante observar que, devido às não-linearidades do sistema, foi verificado através de experimentos que esta constante de tempo diminui muito conforme a temperatura aumenta, podendo chegar à metade do valor encontrado em (5.2) para temperaturas próximas de 100°C.

### 5.3. Resistência térmica equivalente

A resistência térmica equivalente do sistema representa a dificuldade com que o sistema perde calor para o ambiente. Este parâmetro foi calculado dividindo-se o ganho de temperatura  $\theta$ , de 19,56°C, pelo percentual de potência aplicado, de 10%. O valor obtido em função do percentual de potência aplicada é:

$$R_T = 1,9562 \frac{^{\circ}\text{C}}{\% \text{Potência}} \quad (5.3)$$

#### 5.4. Modelo com os parâmetros identificados

Com os parâmetros físicos identificados, pode-se completar a equação (3.3) para a obtenção da função de transferência do aparelho utilizado no projeto:

$$\frac{\theta(S)}{P(S)} = e^{-50s} \frac{1,9562}{10684s + 1} \quad (5.4)$$

### 6. PROJETO DO CONTROLADOR

#### 6.1. Escolha da estratégia de controle

A escolha do tipo de controlador a ser utilizado foi baseada nas vantagens e desvantagens de cada um, bem como a dificuldade de implementação. Uma ação proporcional garante a convergência e tende a diminuir o erro de regime, mas pode deixar o sistema oscilatório e levar à instabilidade. Uma ação integral tende a eliminar o erro de regime, mas possui resposta lenta. Uma ação diferencial aumenta a velocidade de resposta e melhora as características de amortecimento. Como o sistema desenvolvido possui um microprocessador com velocidade suficiente para ser capaz de trabalhar com números de 5 casas decimais de precisão (bastante superior à necessária para um bom controle), foi escolhido o controlador do tipo PID, pois este agrega as vantagens de todos os ganhos.

#### 6.2. Diagrama de blocos em malha fechada

A modelagem do sistema determina a simulação e a verossimilhança dos resultados obtidos. Utilizando todos os parâmetros obtidos através dos experimentos, foi feita a implementação do modelo do sistema no ambiente Matlab/Simulink usando diagramas de blocos, como pode ser observado na Figura 6.1.

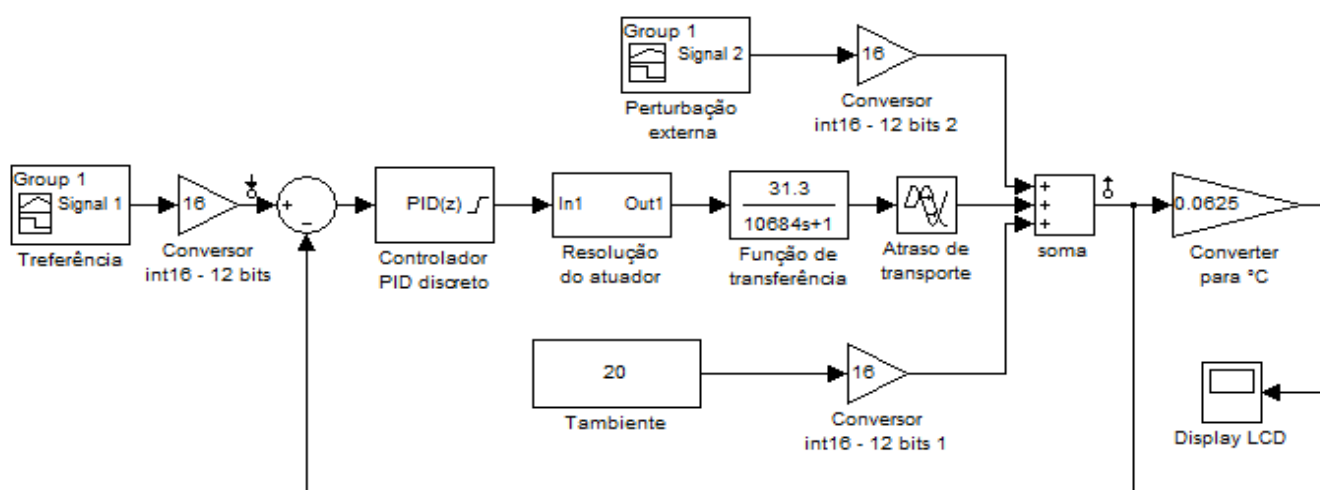


Figura 6.1 – Diagrama de blocos do modelo no ambiente Matlab/Simulink

Alguns detalhes devem ser considerados quando se realiza as simulações visando a subsidiar o trabalho de programação do microprocessador. Por exemplo, a temperatura de

referência deve ser convertida para um número digital com 4 casas decimais para ser tratada do mesmo modo como no microprocessador. Além disso, o controlador PID discreto deve simular o controle com o mesmo intervalo de amostragem que terá o sistema real. A saída do controlador varia de 0 a 100% e deve ser arredondada para uma casa decimal a fim de simular a resolução do sistema de variação do fornecimento de potência calorífica. Este arredondamento é feito no componente “Resolução do atuador”.

A função de transferência do sistema foi programada conforme a equação (5.4), apenas convertendo os valores para os valores representados digitalmente pelo microprocessador e, para o atraso de transporte foi utilizado o correspondente bloco (atraso de transporte) do Simulink.

A temperatura ambiente deve ser multiplicada por 16 para ser convertida para um sinal digital de 12 bits, bem como o sinal de perturbação externa. Isto é necessário para simular a maneira como o microprocessador interpreta a temperatura.

O sinal de perturbação externa foi adicionado ao modelo para simular situações de mudança de carga, como por exemplo, o momento em que a tampa é aberta e objetos em menor temperatura são colocados em contato com a água.

A realimentação teve sua resolução limitada a 1 bit para simular a resolução do sensor de temperatura.

Para a saída de dados, a temperatura digital é convertida em graus Célsius e mostrada no display de LCD.

Além do cuidado na escolha e configuração de cada componente do diagrama de blocos, o *Solver* (algoritmo que resolve as equações matemáticas da simulação) também foi configurado para simular o sistema real, com passo fixo (Fixed-Step) e tempo de amostragem compatível.

### 6.3. Desenvolvimento do software para o microprocessador

O programa é elaborado em um computador e posteriormente gravado no chip do microprocessador. O *software* é programado em linguagens C com partes de código em linguagem assembly. Para auxiliar o desenvolvimento de um *software* de controle que reproduzisse os algoritmos usados no modelo matemático – de modo a garantir resultados e facilitar a sintonia fina – os algoritmos do PID discreto do Matlab/Simulink foram analisados.

Tanto para a integração quanto para derivação numéricas no controlador PID discreto, o Simulink oferece três métodos numéricos: Euler à direita, Euler à esquerda e trapezoidal. A escolha dos métodos a serem utilizados foi feita através de simulações com todos os métodos disponíveis, sendo escolhidos os que apresentaram os melhores resultados.

O Simulink dispõe também de um sistema de bloqueio (*clamping*) do integrador - *Anti-Windup* - que mantém fixo o valor do integrador enquanto a potência do controlador estiver no seu valor máximo. Deste modo, é possível obter respostas mais rápidas em toda a faixa de temperaturas e prevenir que o integrador proporcione resultados com valores excessivos. Para poder incluir esta funcionalidade no software implementado, este sistema foi estudado e programado para agir da mesma maneira que no simulink.

Para o cálculo dos ganhos foram utilizados números com ponto flutuante de 32 bits para evitar problemas significativos de arredondamento que ocorreriam usando números inteiros. O algoritmo de cálculo dos ganhos P, I e D do controlador pode ser visto no APÊNDICE IV.

Com o software compilado e gravado no microprocessador, foram realizados testes para garantir o seu bom funcionamento, eliminar problemas e imperfeições do software.

### 6.4. Ajuste dos ganhos do controlador

Com o sistema funcionando conforme o modelo de simulação no ambiente Matlab/Simulink, foi feito o ajuste dos ganhos do controlador PID. Para uma estimativa inicial foi utilizado o recurso PID Tuner do Simulink, que permite que sejam alteradas as características

de resposta do sistema com visualização da resposta a um passo unitário. Os ganhos ajustados no PID Tuner forneceram resultados dentro dos objetivos propostos.

Em seguida foi feito um ajuste fino dos ganhos no modelo de simulação, no qual estes foram alterados manualmente até que fosse encontrada a melhor resposta possível. Como o modelo no Simulink foi bastante detalhado e fiel ao sistema real, não foi necessária uma sintonia fina experimental, pois o comportamento adequado obtido em simulação foi mantido.

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1. Verificação experimental

Foram feitos testes variando parâmetros do sistema e em todos eles o sistema real apresentou comportamento semelhante ao modelo simulado. O controlador também apresentou uma considerável tolerância a variações no sistema como, por exemplo, com alteração do volume de água, passando este a ser três vezes maior do que o projetado. Ainda assim, o sistema manteve suas características de rapidez e estabilidade. Alguns resultados são discutidos a seguir.

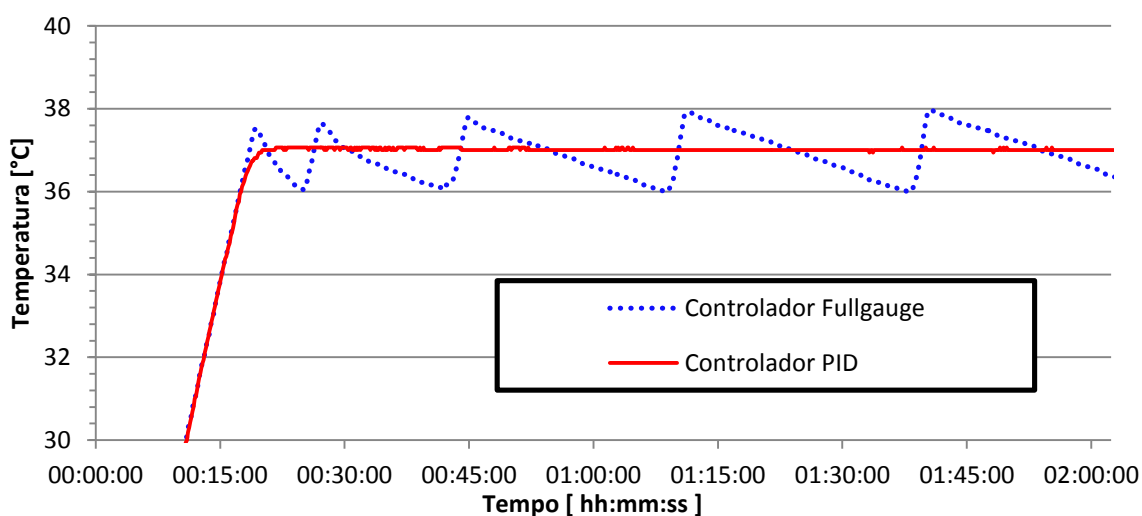


Figura 7.1 – Respostas a um salto a 37°C para os controles de duas posições e PID

A Figura 7.1 mostra o controle de duas posições e o controle PID. Pode-se verificar que o controle de duas posições varia permanentemente com amplitude de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , enquanto o controlador PID permanece estável em  $37 \pm 0,06^{\circ}\text{C}$ .

As figuras 7.2 e 7.3 mostram a resposta simulada e experimental da temperatura e do sinal de controle para um salto de 37°C seguido de um salto a 40°C. As variações bruscas do sinal de controle se devem à ação derivativa de ganho elevado. O sistema apresentou respostas com tempo curto de estabilização de 20 minutos para uma variação de até  $\pm 0,06^{\circ}\text{C}$  em relação à referência. Estes valores atenderam aos objetivos do trabalho.

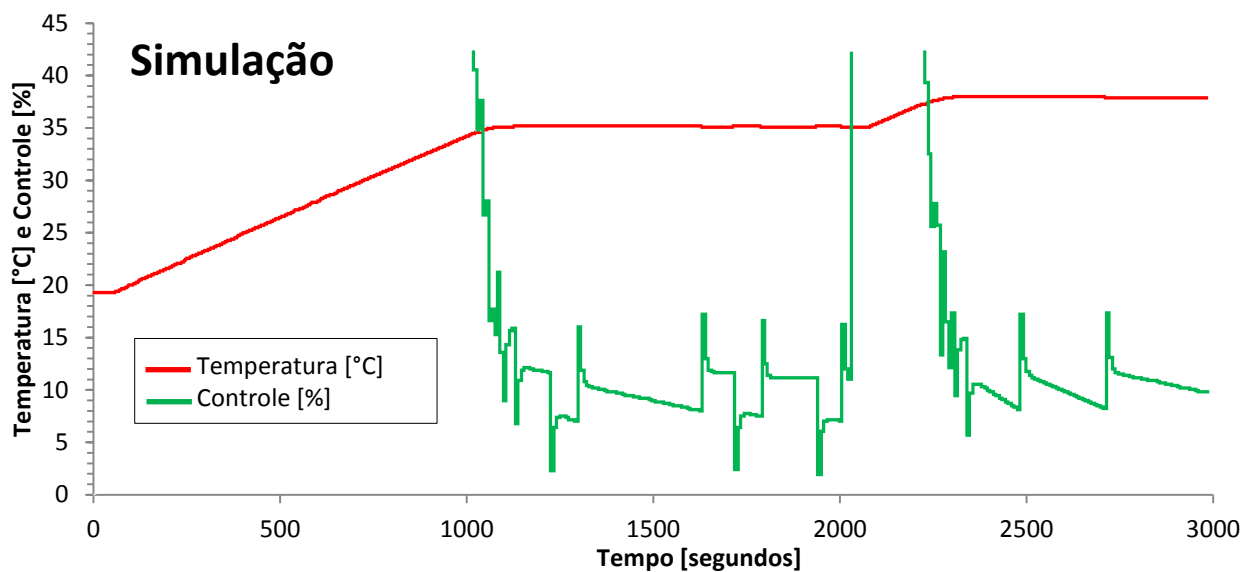


Figura 7.2 – Resposta simulada a um salto a 37°C seguido de um salto de 40°C

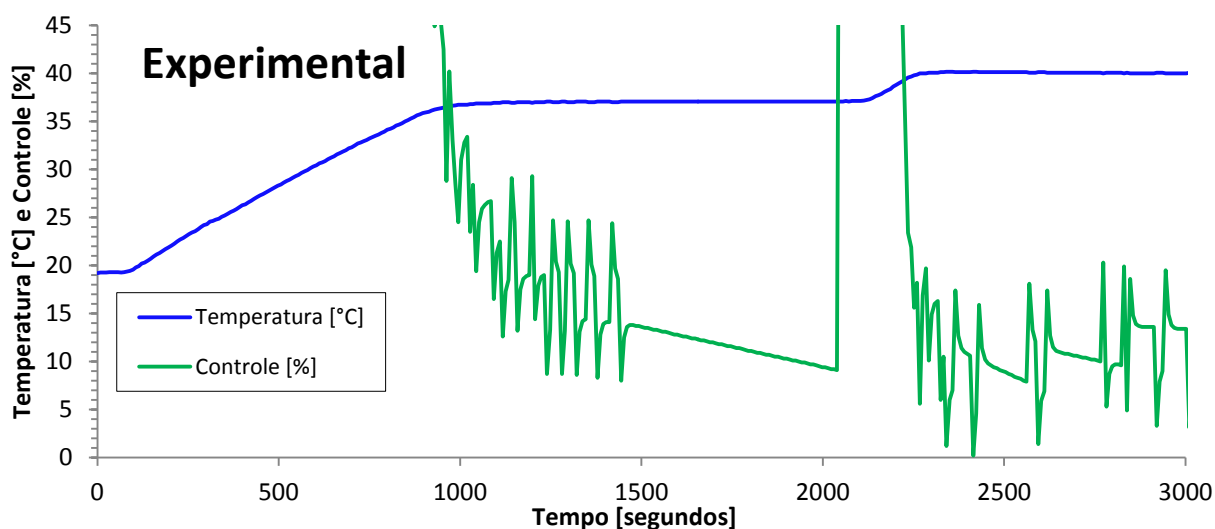


Figura 7.3 – Resposta experimental a um salto a 37°C seguido de um salto de 40°C

As figuras 7.4 e 7.5 mostram a resposta simulada e experimental do sistema controlado por meio dos ganhos P, I, D para um salto de referência a 37°C seguido de um salto a 40°C. Pode-se verificar o sistema *anti-windup* em ação (em azul), congelando a integral (em vermelho) nas situações em que a potência de aquecimento está saturada, e ativando o integrador quando a temperatura está próxima da temperatura de operação.

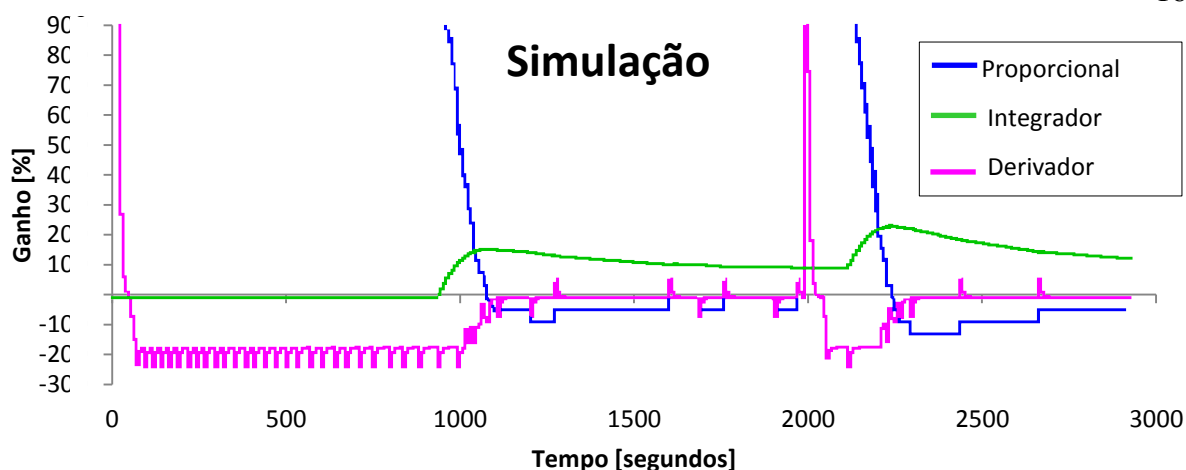


Figura 7.4 – Resposta simulada a um salto de 37°C seguido de um salto de 40°C

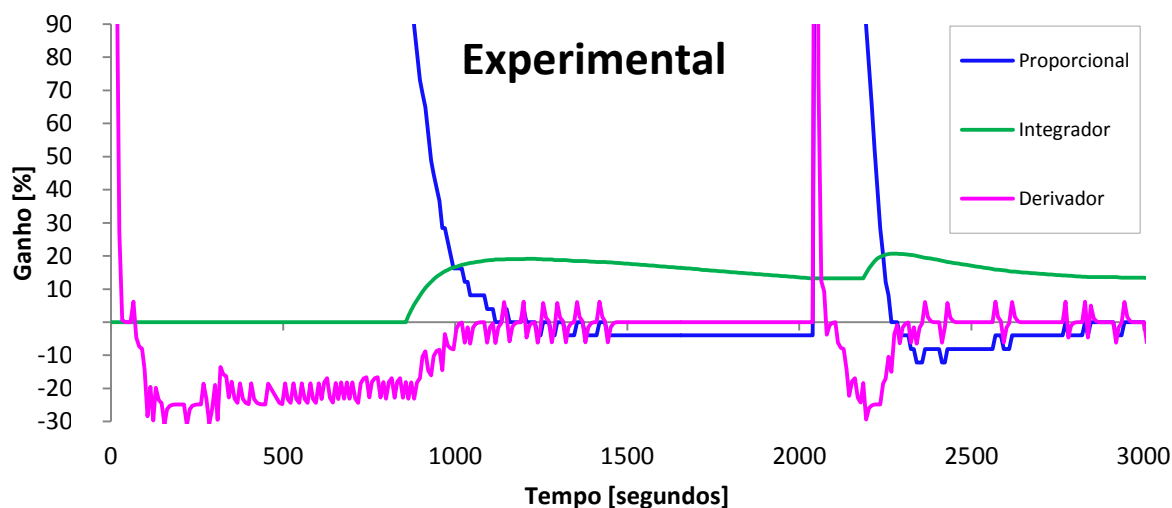


Figura 7.5 – Resposta experimental a um salto de 37°C seguido de um salto de 40°C

## 8. CONCLUSÕES

Com os resultados encontrados, foi concluído que o controlador atende aos objetivos propostos com uma qualidade de controle superior à dos equipamentos comerciais citados. A variação de temperatura, após estabilização, atingiu uma incerteza de  $\pm 0,06^{\circ}\text{C}$ , o que é baixo em comparação com o aparelho *Stern 6 (Grupo GV)*, que é um dos mais utilizados em laboratórios. O controlador foi projetado para poder controlar aparelhos com aquecedores de até 2000 W, porém não foram feitos testes, portanto, não se pode afirmar que a resposta para outras potências de aquecimento será semelhante à encontrada neste trabalho.

Como trabalho futuro, poderá ser levantada uma curva de calibração para compensar os possíveis desvios do sensor de temperatura utilizado. Também, poderá ser feita uma análise de precisão, incluindo os erros de arredondamento e truncamento do software. Outras possibilidades, como a criação de rotinas de auto-calibração, criação de um software específico para monitoramento e controle por computador; criação de uma carcaça em plástico injetado para uma boa apresentação do produto e adequação às normas internacionais deverão ainda ser efetuados. Finalmente, estudos mais aprofundados sobre o desempenho dinâmico e estabilidade do sistema operando em malha fechada deverão ser executados.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Bazanella, A. S.; Silva Jr., J. M. G., "**Sistemas de Controle - Princípios e métodos de projeto**", UFRGS, Porto Alegre, 1ª ed., 2005.

Borche, A., "**Métodos Numéricos**", UFRGS, Porto Alegre, 1ª ed., 2008.

Grupo GV - Equipamentos e projetos para laboratório, "**<http://www.gvequipamentodelaboratorio.com.br>**", Acessado em 16/Junho/2011.

IF - UFRGS, "**Instituto de Física - ComplexWiki**", [http://davinci.if.ufrgs.br/wiki/index.php/Derivada\\_Numérica](http://davinci.if.ufrgs.br/wiki/index.php/Derivada_Numérica), Acessado em 10/06/2011.

International Rectifier, "**IRF840 HEXFET Power MOSFET Datasheet**". Disponível em: <http://www.irf.com>. Acessado em 12/06/2011.

Maxim, "**MAX232 - RS-232 Transceivers**", 2003. Disponível em: <http://www.maxim-ic.com>. Acessado em 12/06/2011.

Maxim, "**DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer**", 04/2008. Disponível em: <http://www.maxim-ic.com/>. Acessado em 12/06/2011.

Microchip, "**PIC16F648 datasheet**", 2004. Disponível em: <http://www.microchip.com>. Acessado em 10/06/2011.

Omega Engineering, "**The Temperature Handbook**", Omega Engineering, Stamford, 1989.

Perondi, E. A., "**Introdução à Teoria de Controle Clássico**", UFRGS, 2009.

Philips Semiconductors, "**BT139 Series Triacs Datasheet**", 1997. Disponível em: <http://www.npx.com>. Acessado em 12/06/2011.

Sieger - Equipamentos Médicos Laboratoriais, "**<http://www.sieger.com.br>**", Acessado em 16/06/2011.

ST, "**MJE13007 Silicon NPN Switching Transistor Datasheet**", 1998. Disponível em: <http://www.st.com>. Acessado em 10/06/2011.

## ANEXO I - Controle de duas posições

É o mais simples dos sistemas de controle, pois atua de forma binária (liga-desliga ou bang-bang), ligando ou desligando o dispositivo atuador conforme a variável controlada se aproxima ou se afasta da referência. Estes sistemas são muito utilizados por serem simples e baratos, porém a sua ação de controle é rústica e como consequência a resposta do sistema apresenta variações grandes e contínuas.



a) Controlador liga-desliga simples

b) Controlador liga-desliga com histerese diferencial.

Figura A<sub>1.1</sub> – Controladores de duas posições. (Fonte: Perondi, 2009)

A função que define o comportamento de um controlador de duas posições pode ser dada por:

$$\begin{aligned} u(t) &= U_1 \text{ para } e(t) \leq 0 \\ u(t) &= U_2 \text{ para } e(t) > 0 \end{aligned} \quad (\text{A}_{1.1})$$

onde  $u(t)$  é o sinal de controle e  $e(t)$  é o erro (desvio da resposta com relação ao sinal de referência).



## APÊNDICE I – Tabela de comparação entre candidatos para o variador de fornecimento de potência calorífica

Componente	Tipo	Tipo de corrente	Corrente máxima	Tensão máxima	Potência máxima dissipada	Tensão absorvida (nota 1)	Potência dissipada (nota 2)	Preço
Ponte retificadora (nota 3)			6 A	400 V		1,00 V	6 W	R\$ 4,00
MJE13007	N-silicon	CC	8 A	400 V	80W	2,00 V	12 W	R\$ 1,70
IRF840	N-MOSFET	CC	8 A	500 V	125W	2,89 V	17 W	R\$ 5,00
TIC226	Triac	CA	8 A	400 V		2,10 V	13 W	R\$ 3,00
BT139	Triac	CA	16 A	500 V		1,70 V	10 W	R\$ 3,50

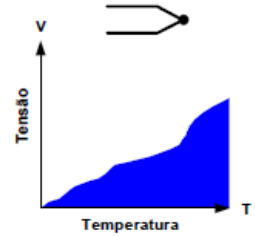
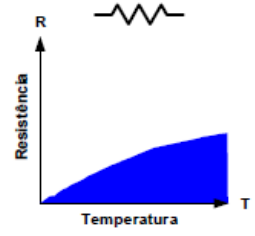
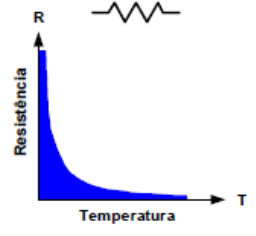
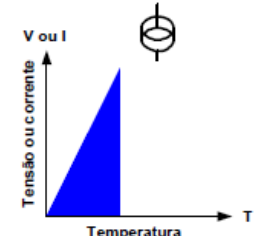
Nota 1: a tensão absorvida é dada pela diferença de potencial entre o Coletor e o Emissor, ou Source e Drain (que é informado na *datasheet* do componente) quando a corrente máxima estiver passando pelo componente. A tensão absorvida é responsável pelo aquecimento do componente.

Nota 2: a potência dissipada no componente é produto da tensão absorvida pela corrente máxima de projeto, que neste caso são 11,1 A.

Nota 3: todos os componentes que operam com CC necessitam da ponte retificadora.

## APÊNDICE II – Comparação entre os tipos de sensores de temperatura disponíveis

(Fonte: Omega Engineering, 1989)

Termopar	RTD	Termistor	Sensor CI
			
Vantagens			
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Auto alimentação</li> <li>-Simplicidade</li> <li>-Robustez</li> <li>-Baixo custo</li> <li>-Ampla variedade de formas</li> <li>-Ampla faixa de temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alta estabilidade</li> <li>-Alta precisão</li> <li>-Linearidade razoável</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Elevado sinal de saída</li> <li>-Rapidez</li> <li>-Medição em duas pontas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Elevada linearidade</li> <li>-Saída amplificada</li> <li>-Baixo custo</li> </ul>
Desvantagens			
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Não-linearidade</li> <li>-Baixo nível de sinal</li> <li>-Necessidade de referência</li> <li>-Baixa estabilidade</li> <li>-Baixa sensibilidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alto custo relativo</li> <li>-Resposta lenta</li> <li>-Requer fonte de corrente de precisão</li> <li>-Pequena variação na resistência</li> <li>-Requer medição em quatro pontas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Não-linearidade</li> <li>-Faixa de temperatura limitada</li> <li>-Fragilidade</li> <li>-Requer fonte de corrente de precisão</li> <li>-Auto aquecimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-T &lt; 250oC</li> <li>-Requer fonte de corrente de precisão</li> <li>-Resposta lenta</li> <li>-Auto aquecimento</li> <li>-Configurações limitadas</li> </ul>

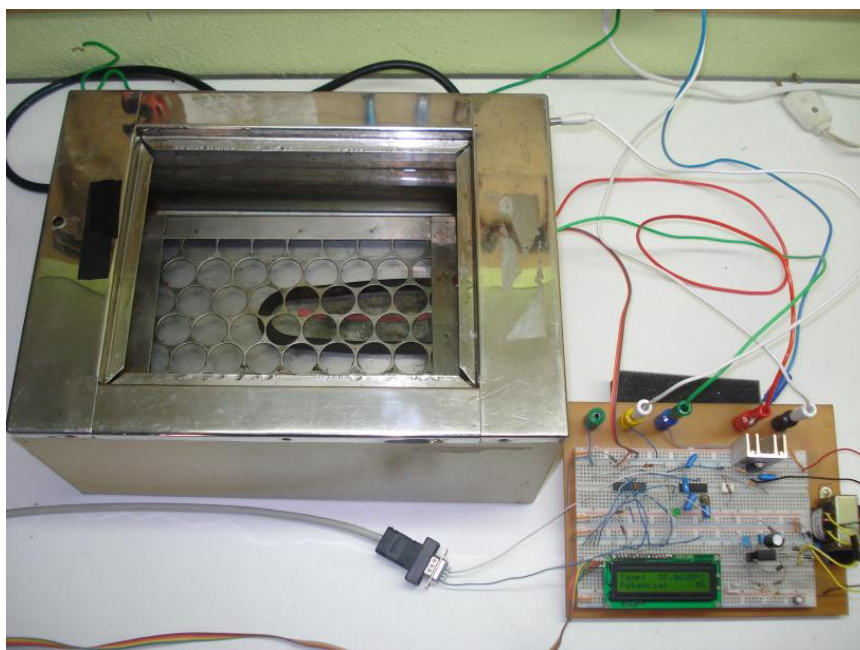


Figura 1 – Sistema montado com o protótipo

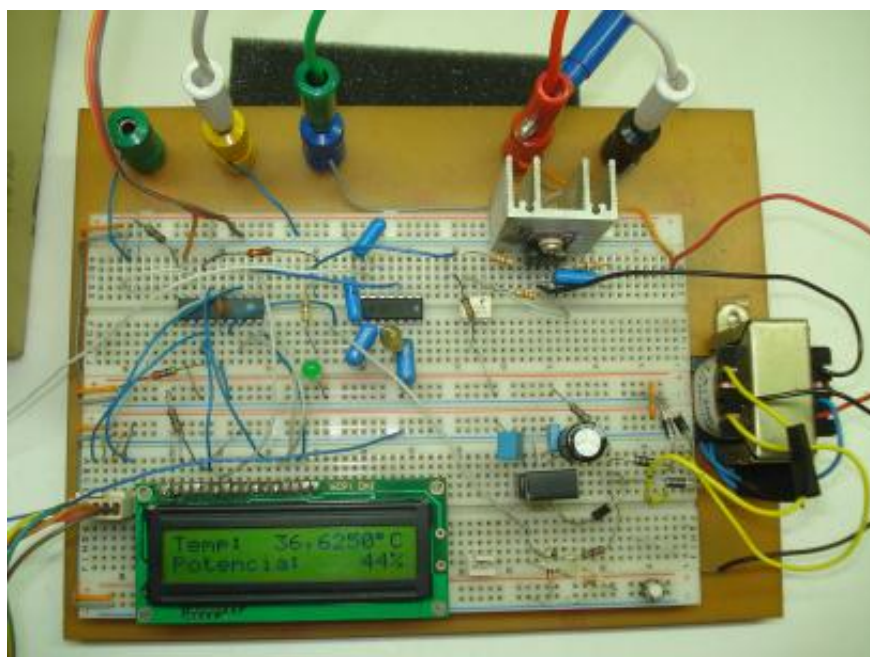


Figura 2 – Protótipo montado em uma proto-board

## APÊNDICE IV - Algoritmo de cálculo dos ganhos do controlador PID

```

void calculate_pid()
{
    // PID Code (Matlab equivalent)
    #define K      1.0          // ganho da soma do PID
    #define Kp     4.06699991  // Ganho proporcional
    #define Ti     0.0085      // Ganho integral
    #define Td     66.1999969  // Ganho derivativo
    #define Ts     8.0         // Tempo de amostragem
    #define N      0.150000006 // Coeficiente do filtro do derivador

    PID_error = (operation_temp - temperature);

    // Proporcional
    PID_P = K*Kp*PID_error;

    // Integral Trapezoidal / Tustin / Matlab com anti-windup
    #define Ki      K*Ts*Ti/2.0
    PID_pre_I = Ki*(PID_error + PID_prev_error); // mudei para PID_prev_error, era o prev_prev
    PID_I += PID_pre_I;
    PID_prev_prev_error = PID_prev_error;

    // Derivativo Trapezoidal / Tustin / Matlab
    #define Kd1     (2.0-N*Ts)/(2.0+N*Ts)
    #define Kd2     (2.0*N*K*Td)/(2.0+N*Ts)
    PID_D = Kd1*PID_prev_D + Kd2*(PID_error - PID_prev_error);

    // Soma
    PID_sum = (PID_P + PID_I + PID_D);

    // Anti-windup
    PID_I_clamped=false;
    is_positive_1 = PID_pre_I >= 0;
    is_positive_2 = PID_sum >= 0;
    // Se o integrador e a soma anterior tiverem o mesmo sinal, e a soma for maior que a saturação
    if( ((is_positive_1 == is_positive_2) && (PID_sum > total_pulses || PID_sum < 0) ))
    {
        PID_I_clamped=true;
        PID_sum -= PID_pre_I;
        PID_I -= PID_pre_I;
        PID_prev_prev_error=0;
    }

    PID_prev_error = PID_error;
    PID_prev_D = PID_D;
}

```