

# Introdução a Engenharia Elétrica - 323100

## Aula S11

---

## Módulo 2 – Introdução ao Controle

---

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamentos da Engenharia Elétrica



**PCS** Computação e Sistemas Digitais

**PEA** Energia e Automação Elétricas

**PSI** Sistemas Eletrônicos

**PTC** Telecomunicações e Controle

**V1.3**

**Outubro de 2018**



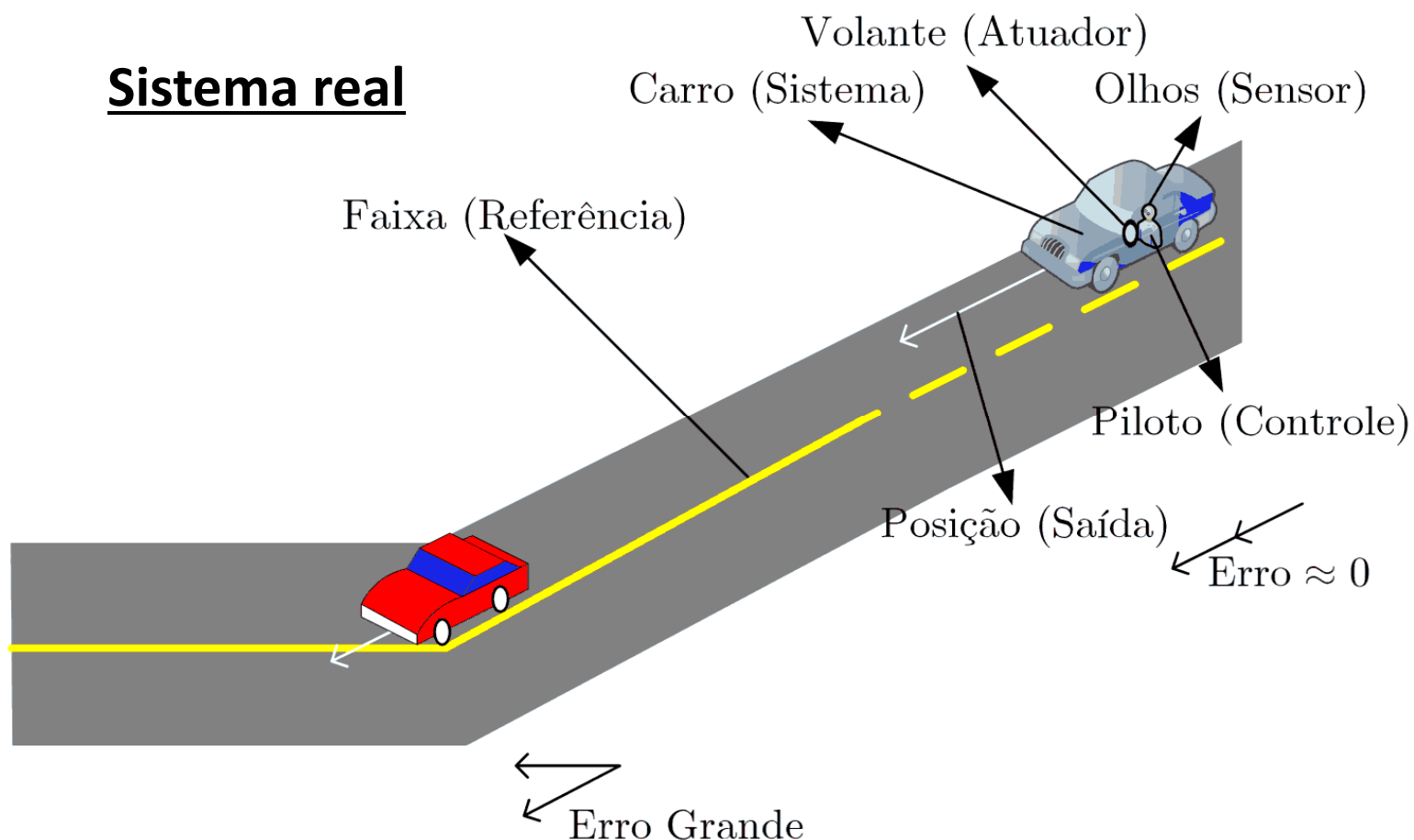
# Sumário

1. Motivação
2. Breve Histórico
3. Introdução
4. Controle Clássico
5. Controladores

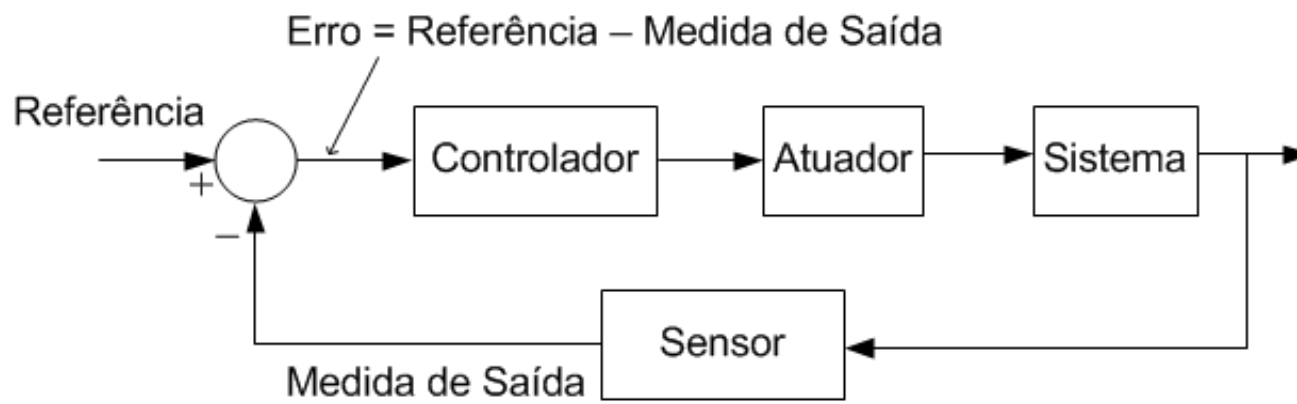


# Motivação

## Sistema real



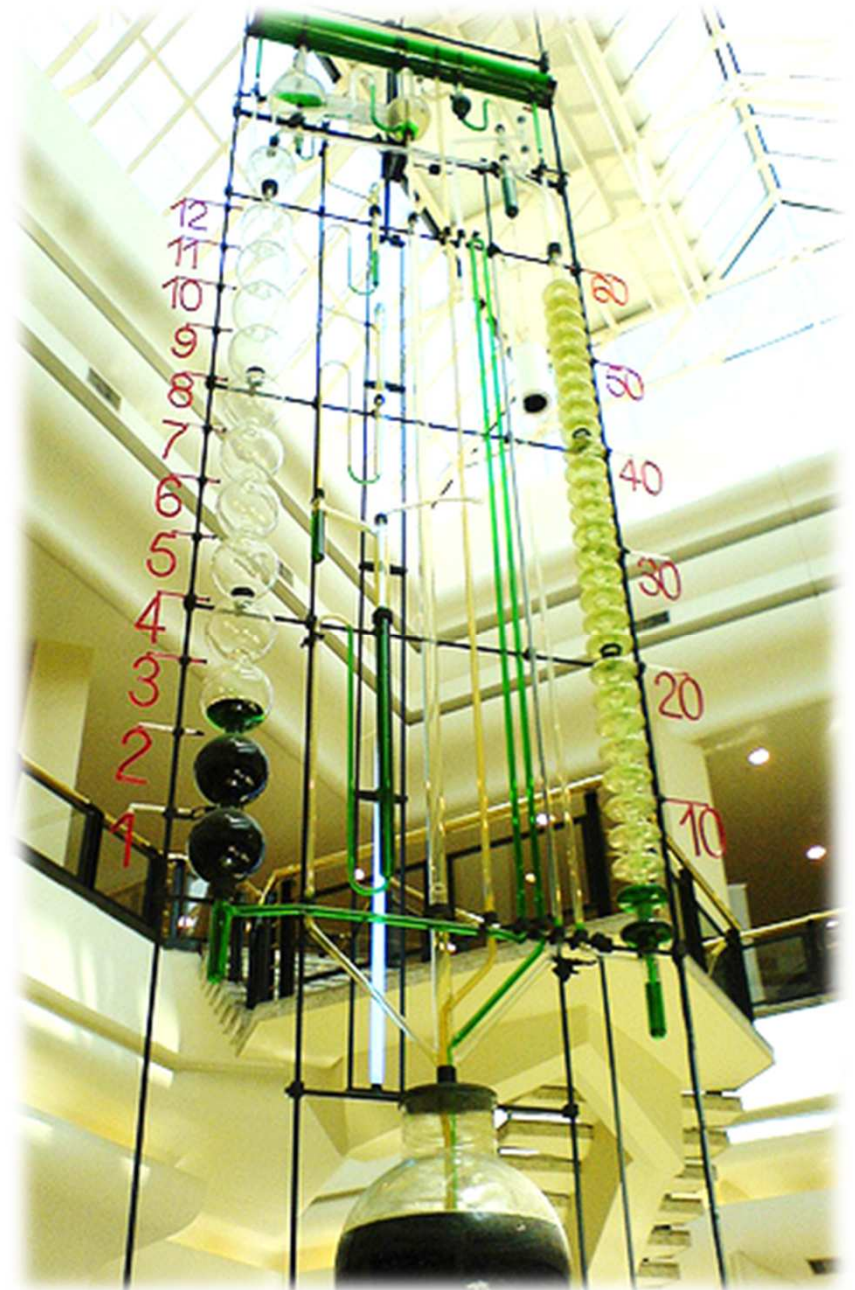
## Sistema representado (modelado) em um diagrama de blocos





# Breve histórico

- Há relatos de técnicas rudimentares de controle na Grécia e em Alexandria:
  - 270 a.C.: relógio de água (*clepsydras*)
  - 10 d.C. - 70 d.C.: Máquina a vapor elementar de Heron (eolípila)
- Aplicações e invenções surgem a partir do século XVIII:
  - ~1730: Rene-Antoine Ferchault de Reamur: dispositivos automáticos para controle de temperatura com termômetro inventado por Cornelius Drebbel (1572-1663).

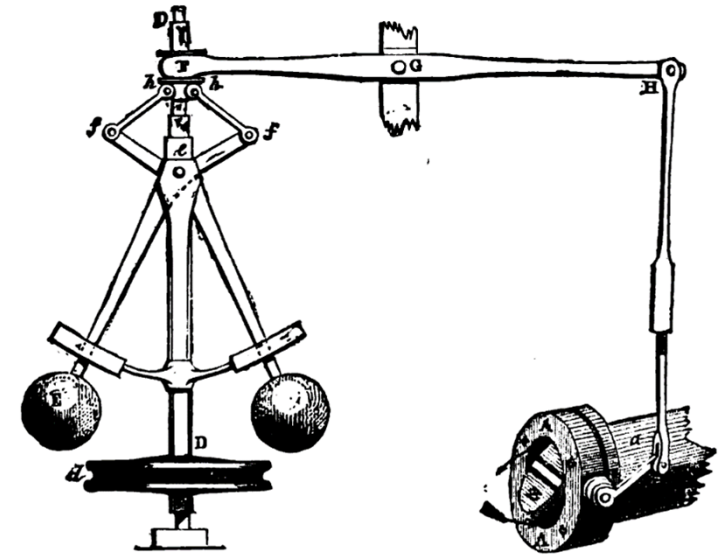




- 1788: Dispositivo para regular (governar) a velocidade de máquinas a vapor rotativas por James Watt.

<http://www.youtube.com/watch?v=EVomz8TXrqE>

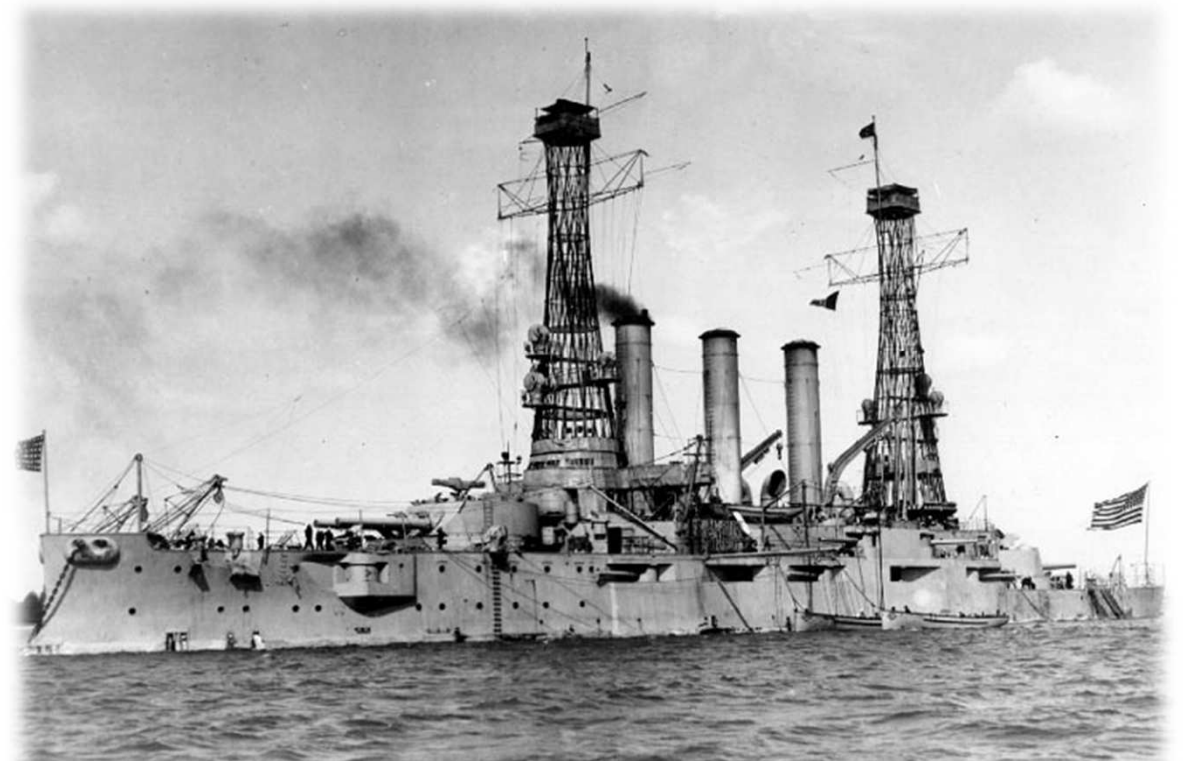
- Vários reguladores de velocidades surgiram como evolução nos primeiros 70 anos do século XIX.



- 1868: James Clerk **Maxwell** mostra como obter equações diferenciais para descrever o comportamento de mecanismos reguladores, além de apresentar uma análise teórica de estabilidade (artigo: “*On Governor*”).



- 1876-1895: Edward J. Routh e Adolf Hurwitz desenvolvem paralelamente um critério que permite determinar diretamente a estabilidade do sistema sem a necessidade da solução das equações.
- 1922-1930: Nicolas Minorsky – aplicação de controladores PID em sistemas de direção automática de navios da Marinha dos Estados Unidos.





- Década de 1920: Laboratórios Bell e o problema de transmissão de sinais a longas distâncias:
  - Harold S. Black inventou amplificadores eletrônicos com realimentação.
  - Hendrik Wade **Bode** e Harry **Nyquist** , entre outros, desenvolveram técnicas para projetar controladores.
- Paralelamente, Clesson E. Mason, da Companhia Foxboro Company, trabalhou no desenvolvimento de amplificadores pneumáticos com realimentação.



**Idéia:** Para possibilitar o controle, deve-se conhecer o estado, a situação, a condição atual de um sistema. Com base nessa informação, estima-se um erro e determina-se uma ação para corrigir esse erro.



- A Segunda Guerra mundial estimulou a pesquisa em sistemas de controle para uso militar. Nos Estados Unidos o MIT foi um centro de desenvolvimento.
- 1948-1950: Walter Evans desenvolve a técnica denominada lugar das raízes, que permite um melhor projeto de controladores.







- Até a década de 1950: a teoria de controle no ocidente era bem consolidada (Controle Clássico), com forte ênfase em métodos no domínio da frequência.
- Década de 1970: setor aeroespacial impulsionou o desenvolvimento do chamado Controle Moderno.
- Técnicas no domínio do tempo passaram a ser consideradas, muito com inspiração no trabalho de Lyapunov.





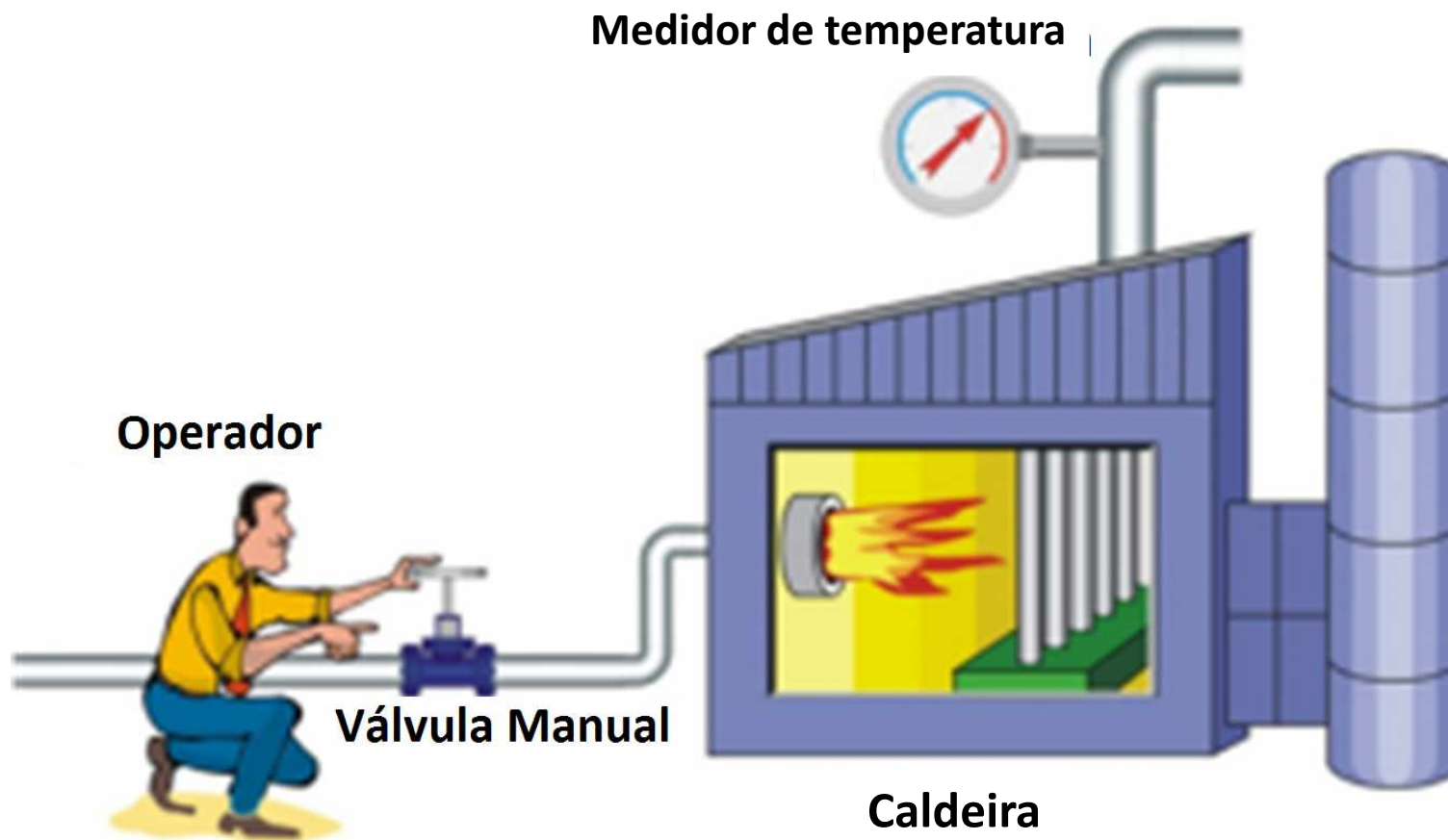
- Início de 1960: Kalman no MIT publica uma série de trabalhos sobre a ideia de variáveis de estado, controlabilidade e observabilidade, regulador linear e filtro de Kalman.
- Nas décadas de 1960 e 1970 → estudo sobre Controle Ótimo e Controle Multivariável.
- 1965: Zadeh introduz o Controle Fuzzy.
- 1980-1990: Doyle introduz o Controle Robusto.





# Introdução ao Controle

- Ex.: operador controlando uma caldeira manualmente.





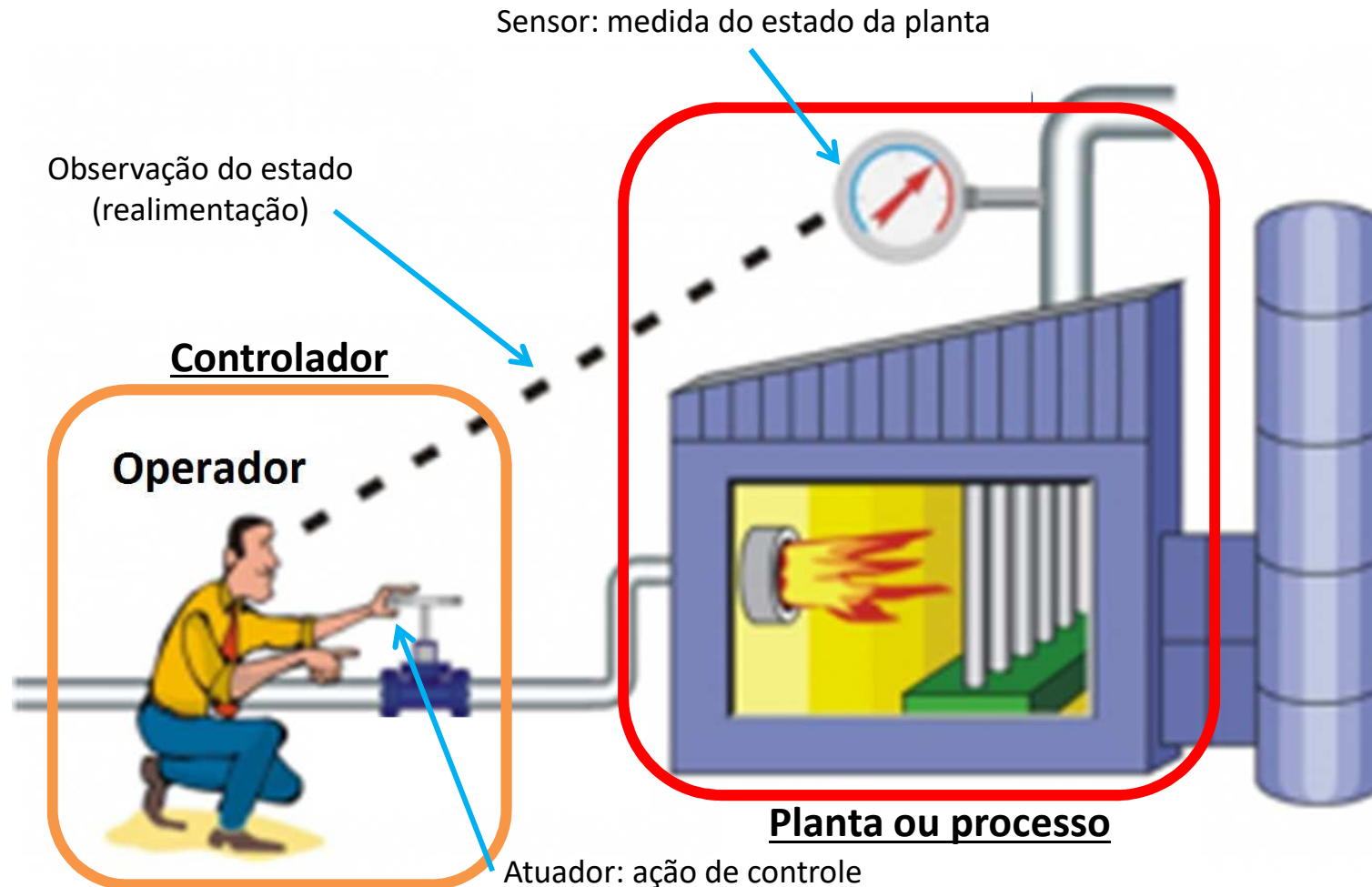
# Definições

- **Sistema:** conjunto de componentes conectados de forma ordenada para agir como uma unidade.
- **Planta ou Processo:** sistema que é o objeto da ação do sistema de controle.
- **Controlador:** faz a regulação, o direcionamento, através de uma ação de comando, com base em um estado atual do processo e um estado desejado.
- **Atuador:** Local onde o controlador realiza a ação de comando.
- **Sensor:** Local de onde se obtém medidas do estado atual de um processo.
- **Sistema de Controle:** interconexão de sistemas e processos com o propósito de manter um “equilíbrio” ou estabilidade, por exemplo, controlar algum estado do sistema.



# Controle manual

- Nesse exemplo de sistema de controle manual...



O operador observa o estado da planta (temperatura da caldeira) e atua na válvula liberando mais ou menos calor, para fazer com que a temperatura permaneça dentro de um patamar desejado.

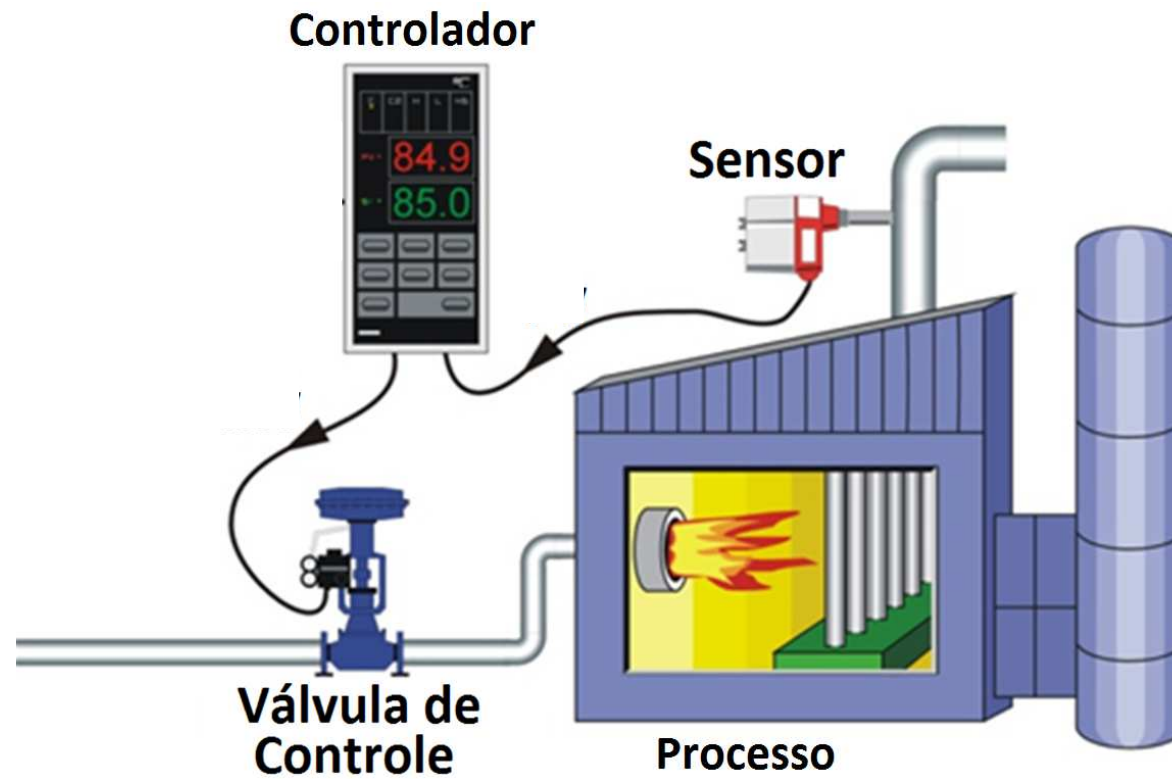


**Mas e se o**  
**operador**  
**dormir ?**



# Controle automático

- Ex. de um sistema de controle automático.

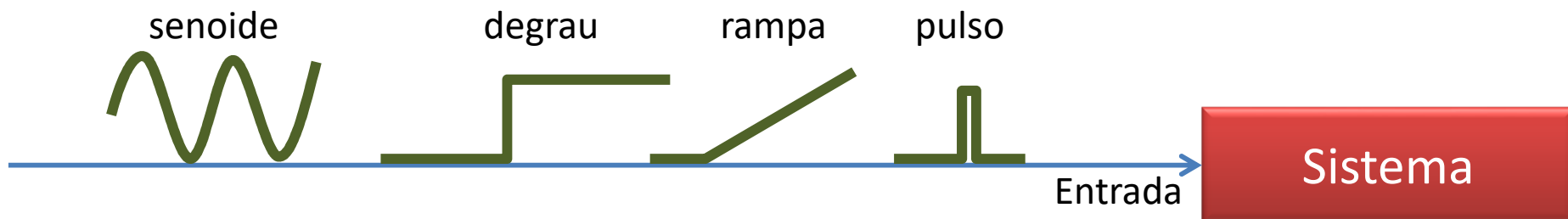


**Autônomo,**  
**24 horas,**  
**7 dias por semana,**  
**mais rápido,**  
**garante**  
**qualidade e**  
**repetibilidade no**  
**processo, reage**  
**automaticamente**  
**às variações na**  
**planta, não dorme!**



# Mais definições - entradas

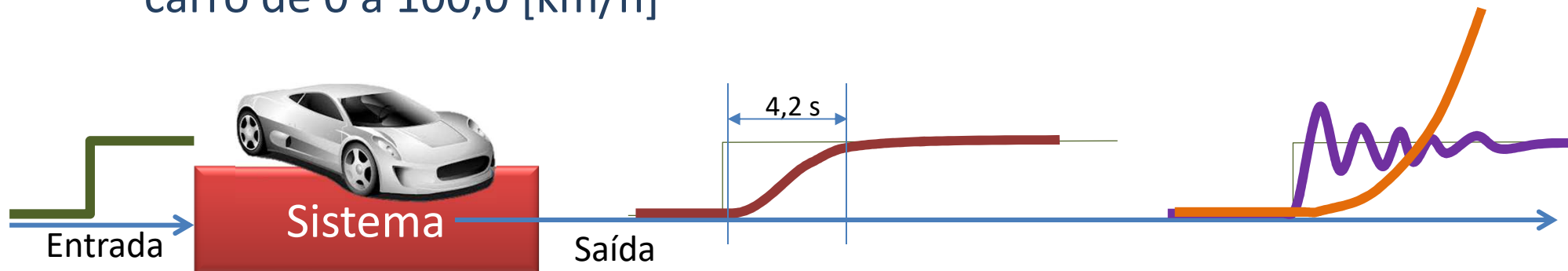
- **Entradas de um sistema:** pontos onde se aplica uma ação ou mudança. Ex.: Uma válvula, um relé, um motor, ...
  - Uma ação na entrada fornece um estímulo para o sistema, que reage a essa solicitação.
  - As entradas podem ser graduais, como o pedal de um acelerador de um veículo, ou abruptas, como um interruptor liga/desliga.
  - Associa-se às entradas funções de excitação típicas, tais como seno, um valor constante, um pulso, uma rampa, um degrau, ...





# Mais definições - saídas

- **Saídas de um sistema:** pontos onde é possível observar, perceber, notar ou medir um determinado estado ou característica do sistema.
  - Ex: um sensor de temperatura, um sensor de vazão, um sensor de nível,...
  - Pode-se verificar a resposta do sistema para uma dada ação em sua entrada.
  - Pode-se medir o desempenho de um sistema pela característica de resposta de uma de suas saídas. Ex. O tempo de aceleração de um carro de 0 a 100,0 [km/h]



Entrada: Acelerador do carro.  
Tipo: Degrau (pé na tábua!)

Saída: Velocidade do carro.  
Tempo de aceleração de 0 a 100 km/h = 4,2 s

Outros tipos de respostas na saída de um sistema...

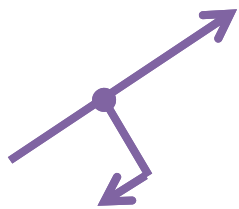




- **Diagrama de Blocos**

- Linguagem para representação de sistemas, em seus modelos matemáticos e relacionamentos de entradas e saídas ao longo do tempo, por exemplo.

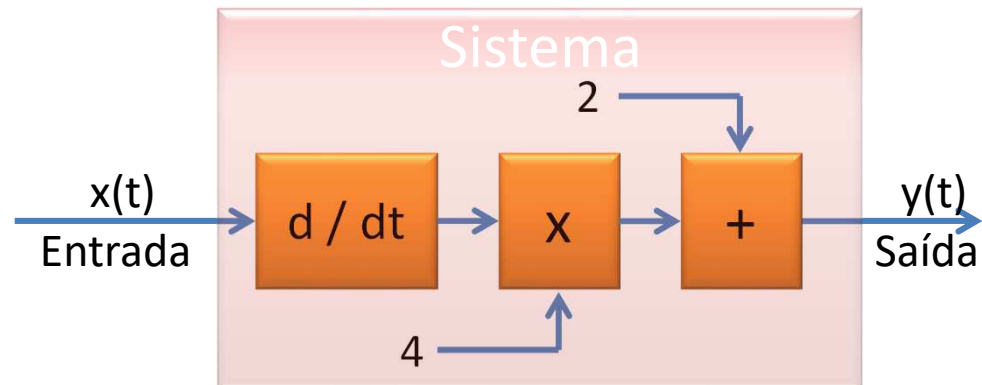
- Partes:



- Setas – usada para representar o sentido do fluxo de informações ou sinais, das saídas para entradas.



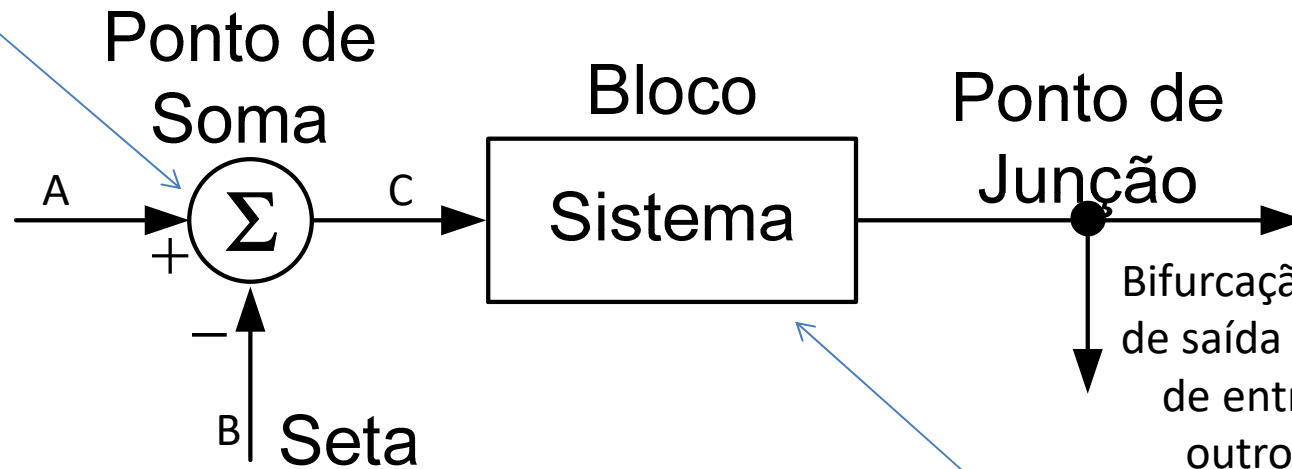
- Bloco – representa uma sistema que transforma um sinal de entrada em um sinal de saída. Pode ser descrito por uma equação algébrica ou diferencial. Ex.:  $y=f(x)$ , onde  $f(x) = 2+4.(dx/dt)$ .





# Exemplo de diagrama de blocos

Bloco aritmético que soma a entrada A com a entrada -B, produzindo C



Saída proveniente de outro bloco, servindo como entrada para outros.

Conjunto de equações diferenciais para representar o comportamento do sistema ao longo do tempo, por exemplo.

Bifurcação: um sinal de saída pode servir de entrada para outros blocos



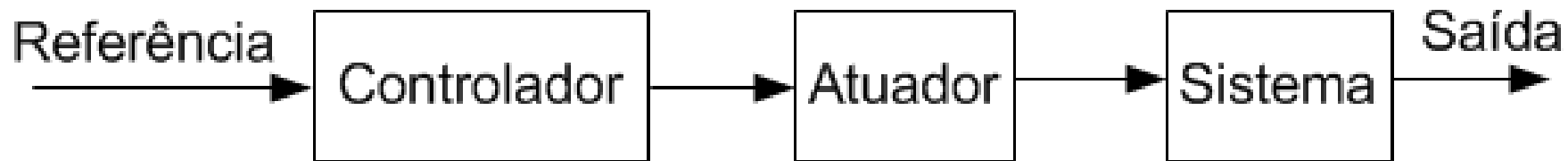
Se uma saída for utilizada como entrada de blocos anteriores, criamos uma realimentação em um sistema.

Mas nem todo o sistema precisa de realimentação!!



# Tipos de controle – MA

- Controle em Malha Aberta (MA)



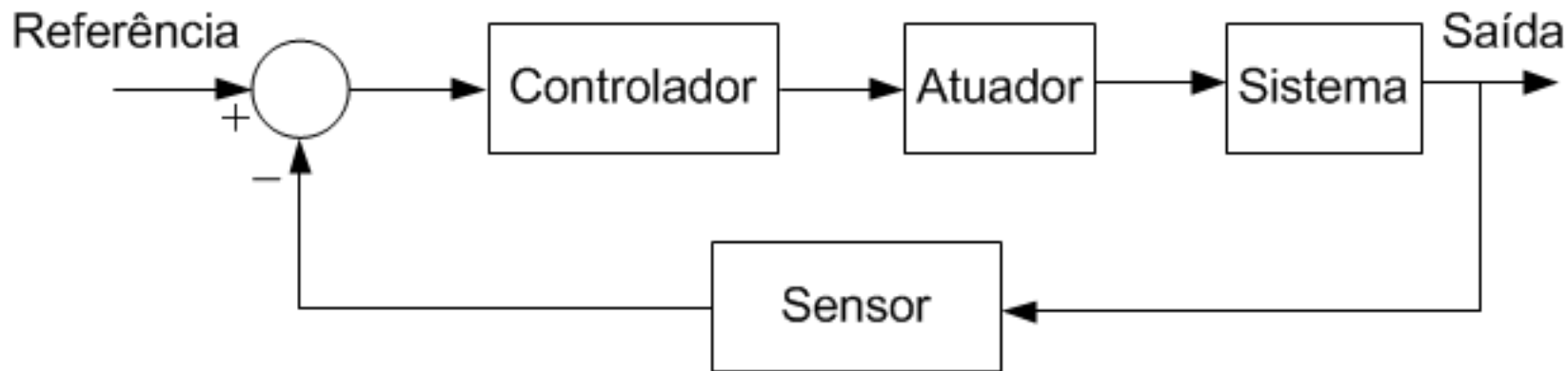
- Controlador em série com a planta a ser controlada.
- Controla diretamente o processo sem utilizar retroação, (sem realimentação), com base em um valor de referência.
- Simples, mas sensível a distúrbios e variações do sistema do planta.
- Impossibilidade de autoregulação.
- Ex.: Forno caseiro de assar bolos!





# Tipos de controle – MF

- Controle em Malha Fechada (MF)

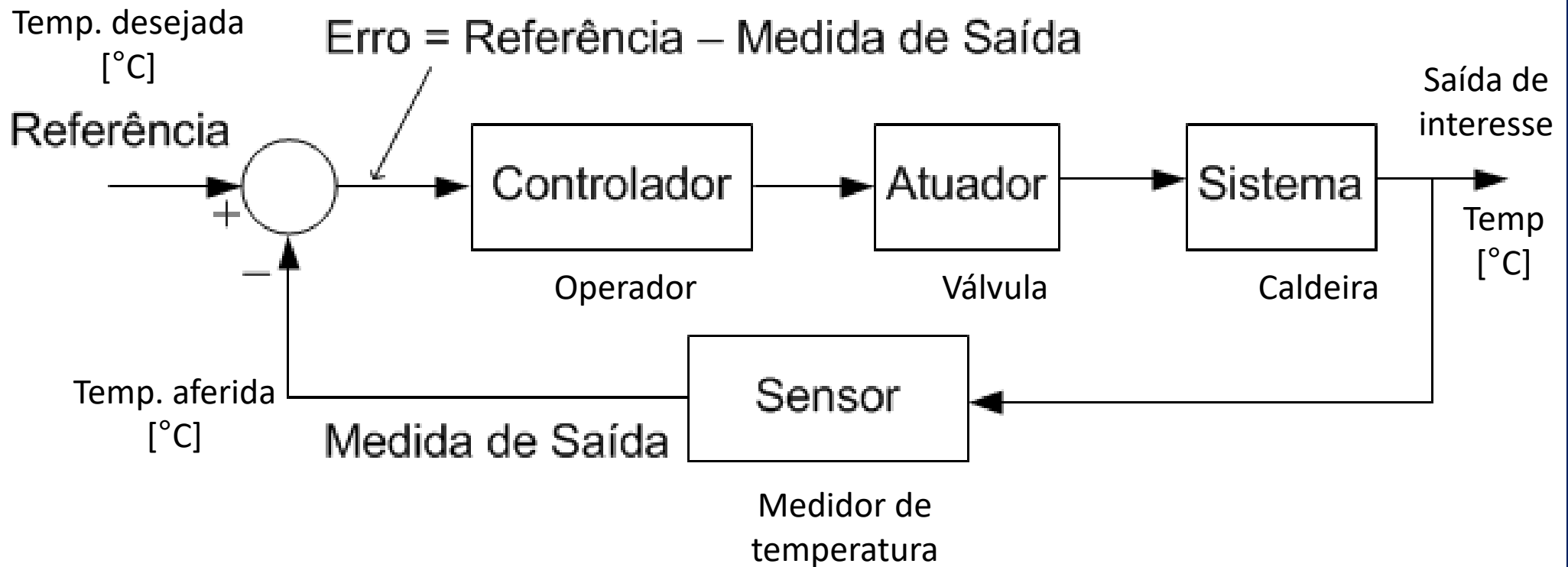
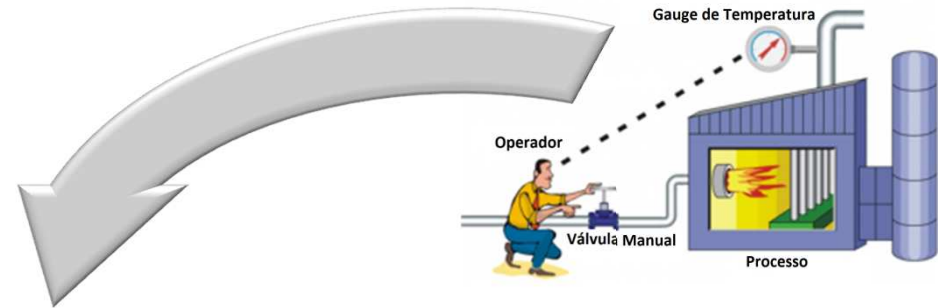


- Usa uma medida de saída e a retroação (realimentação) desse sinal para compará-lo com um valor desejado de referência.
- Compensa perturbações adicionais através de uma retroação do sinal. Maior robustez; autoregulação.
- Ex.: Segway! Controle mantém o equilíbrio do sistema.





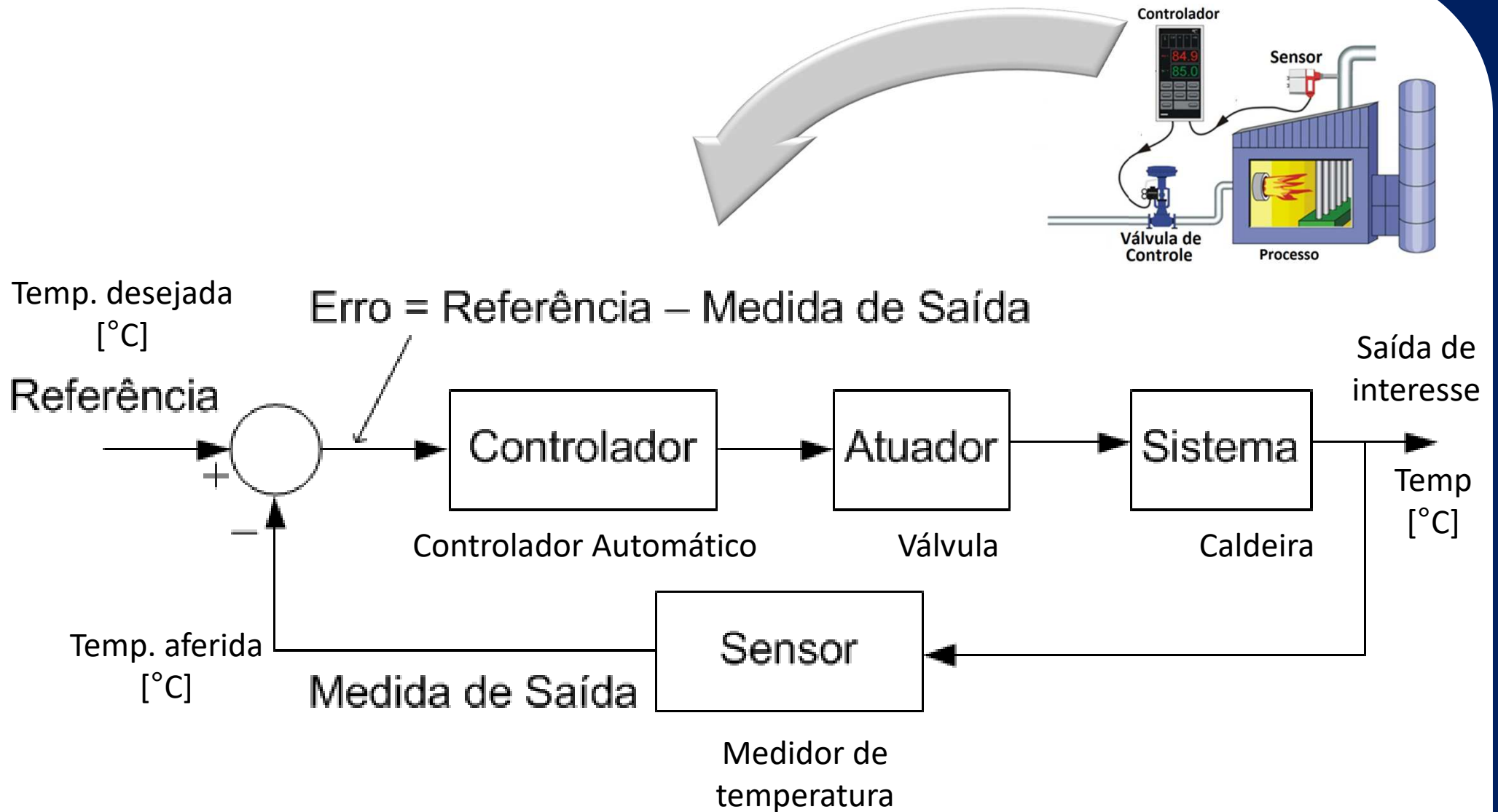
# Um sistema de controle manual em diagrama de blocos



**O operador é o controlador e ele fecha a malha do sistema de controle!**



# Um sistema de controle automático em diagrama de blocos

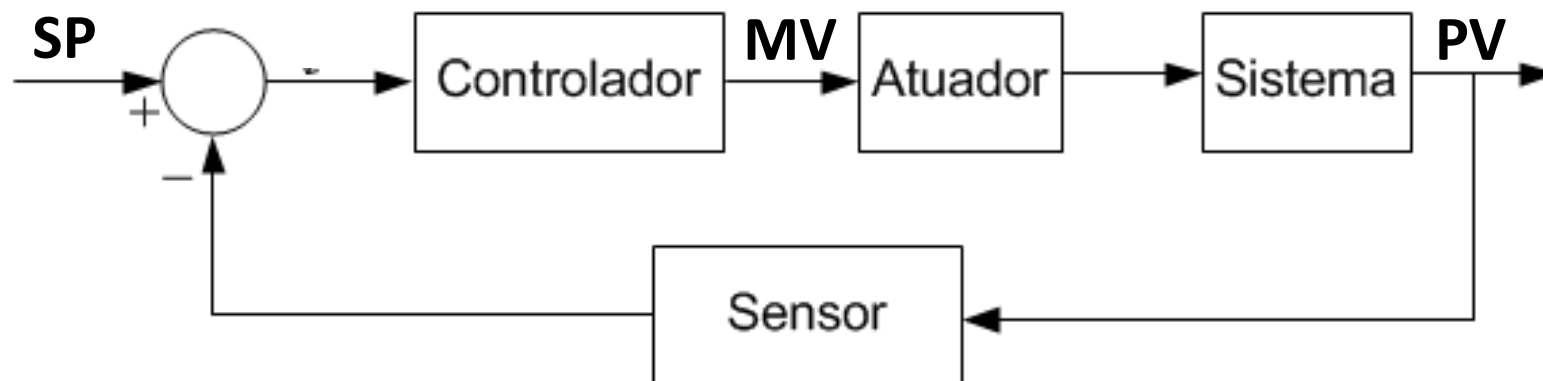


**Um controlador automático fecha a malha do sistema de controle!**



# Mais definições

- **Variável de referência ou *set point* (SP):** é a entrada de referência, valor desejado da variável a ser controlada.
- **Variável controlada ou de processo (PV):** é qualquer variável que se deseja controlar. Em geral, é uma saída do processo.
- **Variável de comando (MV):** saída do controlador.





# Conceito de ação de controle

- A ação de um controlador pode ser direta ou reversa:
  - Ação Reversa: Se **PV** aumenta, **MV** diminui. Tipicamente utilizada em controles de aquecimento. Se a temperatura aumentar, a atuação no elemento aquecedor deve diminuir. Na ação reversa, é conveniente definir o **erro** do sistema como **SP-PV**.
  - Ação Direta: Se **PV** aumenta, **MV** aumenta. Tipicamente utilizada em controles de refrigeração. Se a temperatura aumentar, a atuação no elemento refrigerador deve aumentar. Na ação direta, é conveniente definir o **erro** como **PV-SP**.





# Conceito de estabilidade

- Em geral deseja-se um sistema estável, cuja saída seja limitada, para uma entrada limitada.
- Ex.: Manter uma bolinha em uma certa posição fixa após algum impulso.

Bolinha está em uma posição estável.

**Estável**

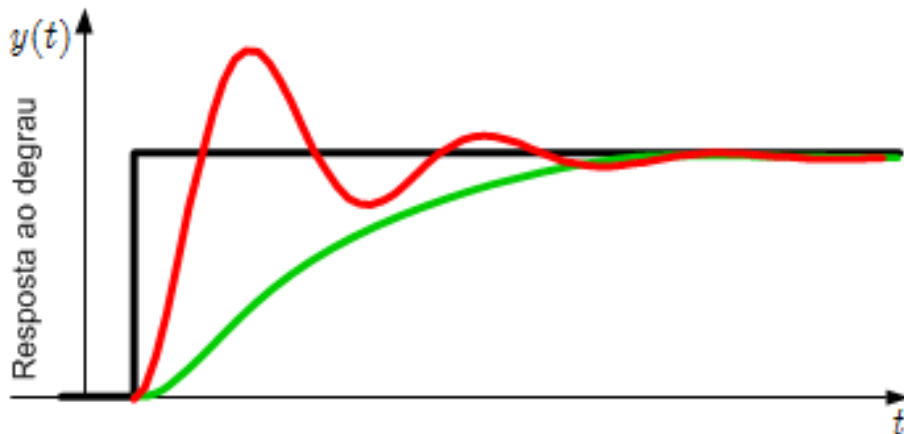
**Instável**

Bolinha está na iminência de cair!!

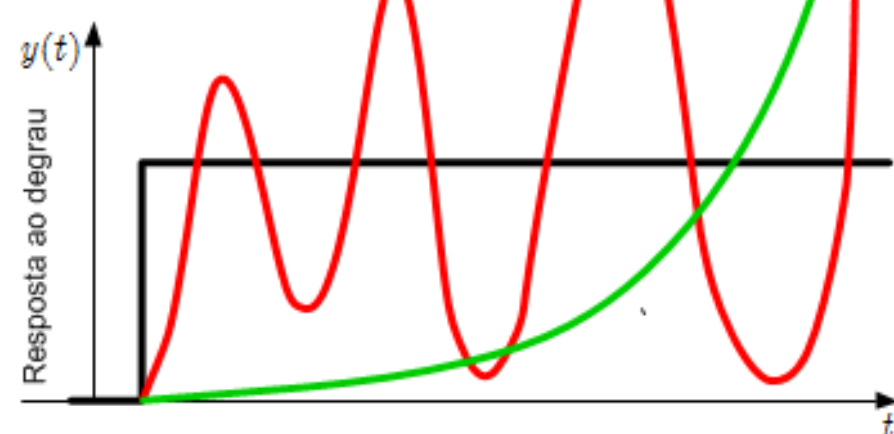


- Outros exemplos de respostas estáveis e instáveis para uma entrada tipo degrau.

**Estáveis**



**Instáveis**

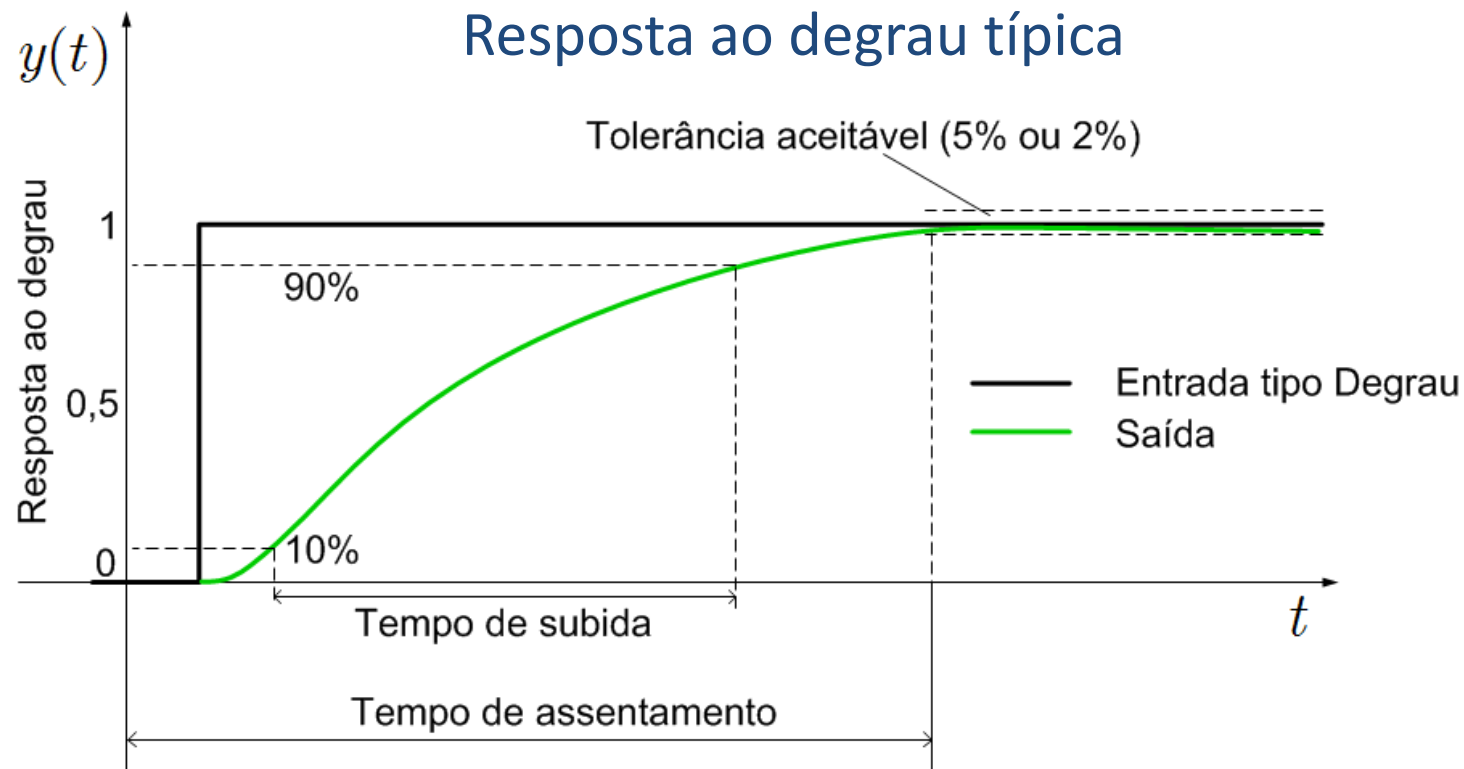




# Exemplo de resposta estável ao degrau

- **Resposta ao degrau**

- Degrau: Um sinal de *setpoint* é variado abruptamente.
- Usualmente mede-se o desempenho do sistema pelos tempos de resposta (tempo de subida, tempo de assentamento ou acomodação, etc.).
- Às vezes, mesmo após o  $t \rightarrow \infty$ , o sistema pode apresentar erro constante com relação ao valor desejado (erro de regime).



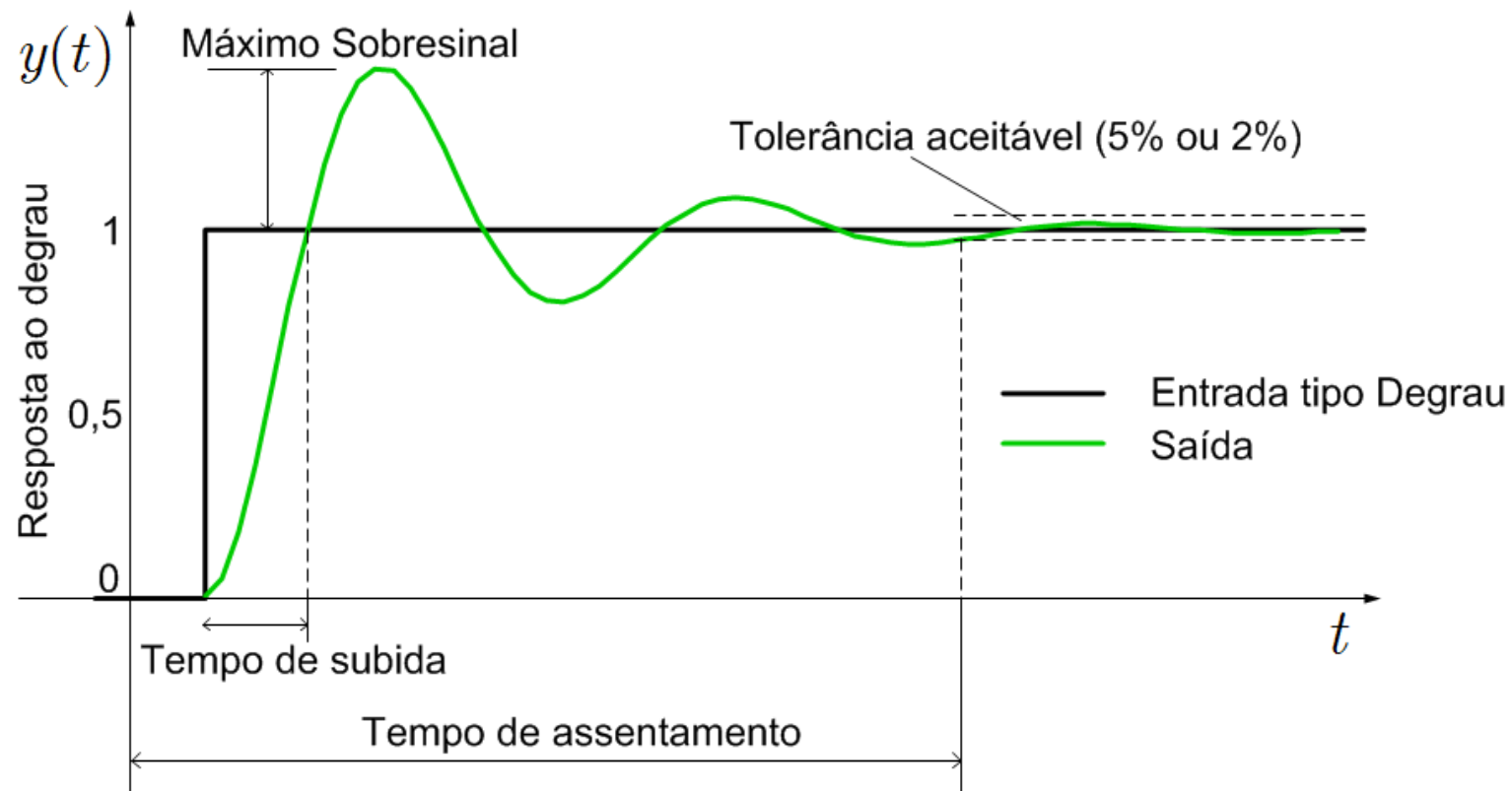


# Outro exemplo de resposta estável ao degrau

- **Resposta ao degrau**

- Alguns sistemas apresentam comportamento oscilatório com algum amortecimento.
- Nesse caso, usualmente mede-se também o sobressinal máximo.

## Resposta ao degrau típica





# Início das atividades práticas



## Atenção!!!

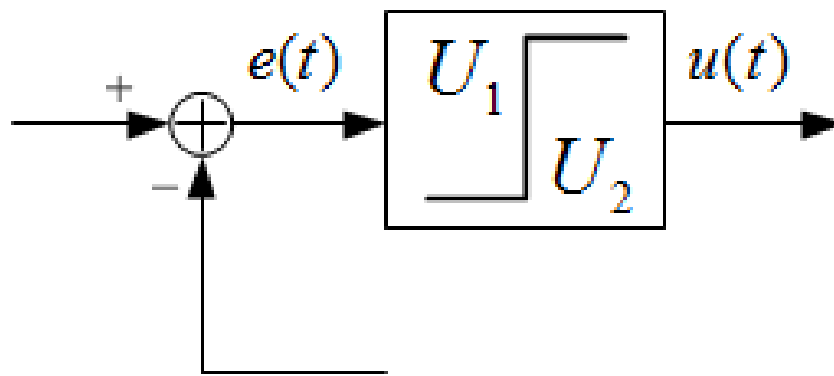


- As experiências desenvolvidas lidam com componentes energizados, como resistores, que possuem temperaturas em sua superfície bastante elevadas (próximas a 100,0 °C). Cuidado com sua manipulação!!!!
- Não deixe seu sistema sem supervisão, operando de forma desassistida. Se seu controlador automático falhar, pode-se chegar em altas temperaturas, ocasionando a queima, derretimento ou destruição dos materiais, além de outros prejuízos.
- Em caso de emergência, cheiro de queimado, etc. desligue as alimentações do circuito: fontes, cabos USB, etc.
- Não conduza essas experiências em local inapropriado. Faça-as em um laboratório didático, com equipamentos e supervisão adequada.



# Controladores

- Controlador ON-OFF:
  - Elemento atuante possui apenas duas posições fixas.
  - Controle relativamente simples.
  - $u(t)$ : sinal na saída do controlador;  $e(t)$  sinal de erro.

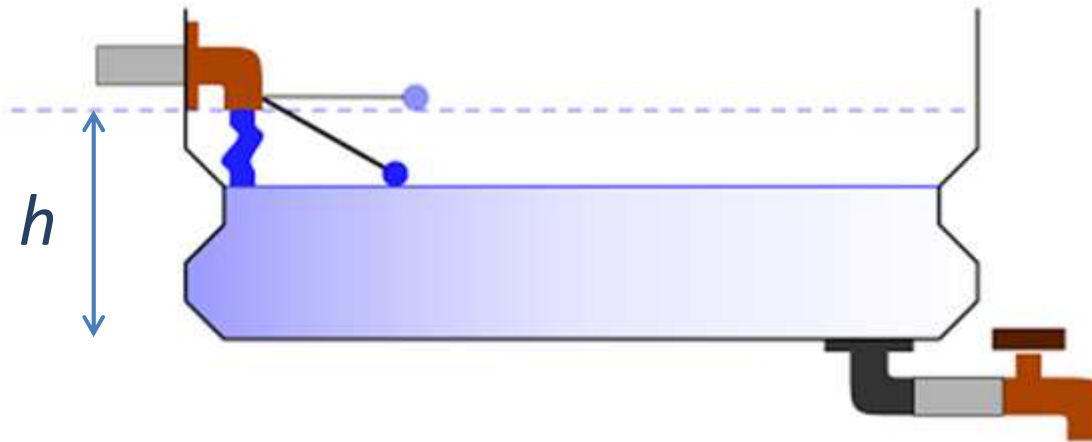


$$u(t) = \begin{cases} U_1, & \text{se } e(t) \geq 0 \\ U_2, & \text{se } e(t) < 0 \end{cases}$$



- Controlador ON-OFF

- Exemplo: caixa d'água residencial: o flutuador percebe a altura do nível da água e movimenta a haste. Quando o flutuador atinge o nível  $h$ , a vazão é interrompida. Qualquer redução de nível é sentida pelo flutuador e a vazão de entrada é reiniciada.



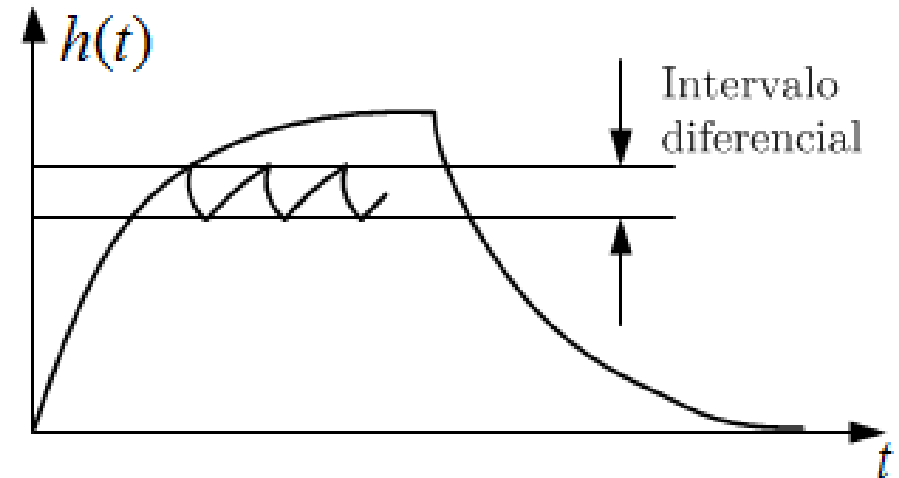
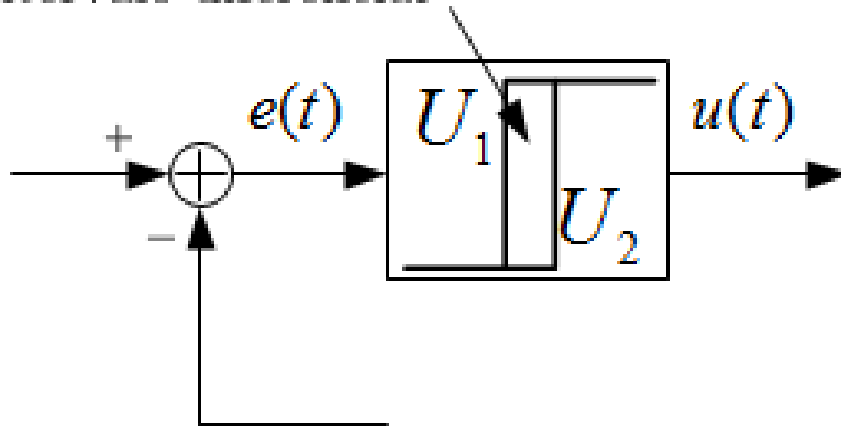
- Pode provocar desgaste excessivo no atuador.
- Outro exemplo: sensor fotoelétrico para ligar/desligar a iluminação pública nos postes.



# Controladores

- ON-OFF com Intervalo Diferencial (Histerese):

Intervalo diferencial

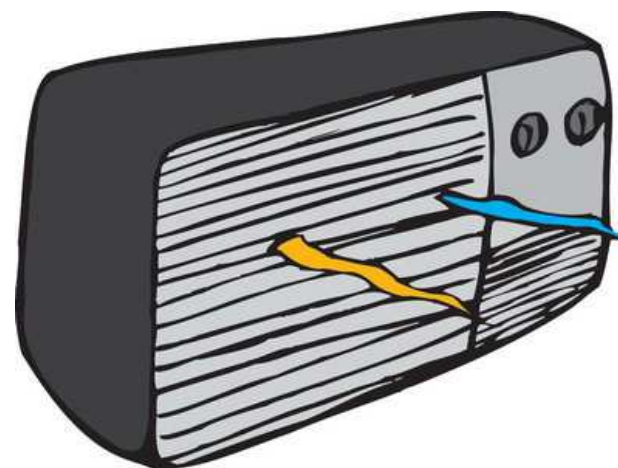


- Evita desgaste do atuador pelo elevado número de comutações.
- Oscilações diminuem reduzindo-se o intervalo diferencial, mas o número de comutações aumenta.



# Controladores

- Exemplos: geladeira e ar condicionado.









# Atenção!!!



- As experiências desenvolvidas lidam com componentes energizados, como resistores, que possuem temperaturas em sua superfície bastante elevadas (próximas a 100,0 °C). Cuidado com sua manipulação!!!!
- Não deixe seu sistema sem supervisão, operando de forma desassistida. Se seu controlador automático falhar, pode-se chegar em temperaturas bastante elevadas, ocasionando a queima, derretimento ou destruição dos materiais.
- Em caso de emergência, desligue as alimentações do circuito: fontes, cabos USB, etc.



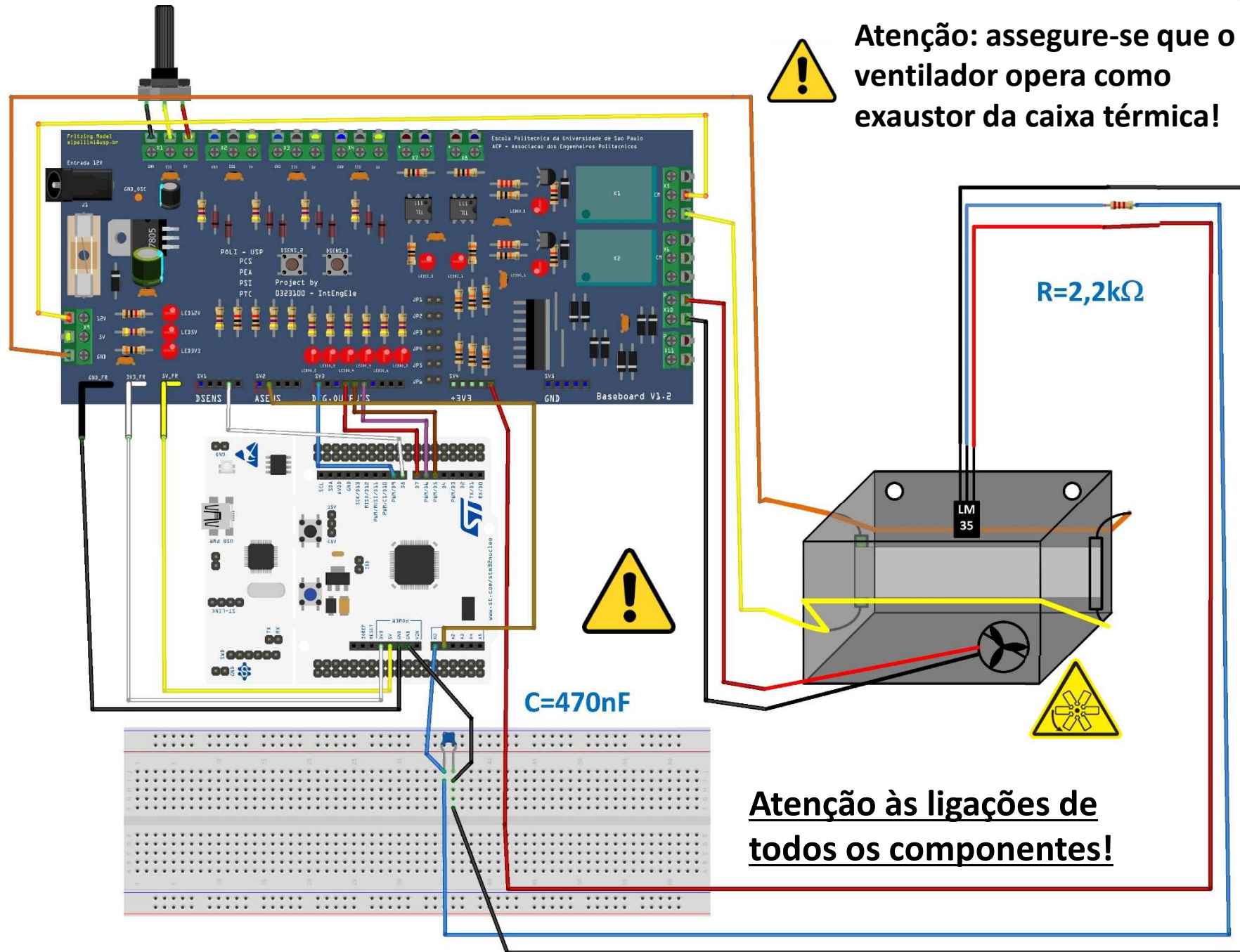
# Atividade 1

- Controle ON-OFF Manual

- Ligue a resistência em uma das saídas a relé, com tensão de 12V fixa.
- Ligue a ventoinha em uma das saídas PWM.
- Ligue o botão DSENS\_2 (pino 4 no conector DSENS) em uma entrada digital para ligar a desligar a ventoinha no controle manual.
- Deve-se ligar e desligar a ventoinha com cliques no botão DSENS\_2, de forma a controlar a temperatura manualmente em torno de um valor ajustado no potenciômetro de referência. No programa acione o LED do kit STM32 toda a vez que acionar a ventoinha.
- Monitore a temperatura via comunicação serial com o Teraterm.



# Montagem prática para as atividades





## Controle ON-OFF Manual

```
#include "mbed.h"
AnalogIn LM35(PA_0);
AnalogIn POT(PA_1);
DigitalIn botao(PA_9);
DigitalOut dir_1(PB_10);
DigitalOut dir_2(PB_4);
DigitalOut led(LED1);
DigitalOut rele(PC_7);
PwmOut fan(PA_8);
Serial PC(USBTX, USBRX);
int main(){
    int last_botao=0, Acao=0;
    float Temp=0.0, Ref = 0.0;
    dir_1=1; dir_2=0; //Direção da ponte H
    fan=0.0; fan.period(0.0001);
    led=0; rele=1;
    while(1) {
        Ref = 20*POT+30; //Referencia vai de 30oC a 50oC ao variar o POT
        Temp=LM35*330.0; //Converte leitura para oC
        if(botao == 1 && last_botao == 0)
        {
            fan = !fan; Acao = !Acao; led = Acao;
        }
        last_botao = botao;
        PC.printf("%d \t %2.1f \t %2.1f\r\n", Acao, Ref, Temp);
        wait(0.2);
    }
}
```



# Atividade 2

- Atividade 2: Controle ON-OFF Automático
  - Ligue a resistência em uma das saídas a relé, com tensão de 12V fixa.
  - Ligue a ventoinha em uma das saídas PWM.
  - No seu programa, faça uma lógica de controle ON-OFF para manter a temperatura no interior da caixa em torno de uma temperatura ajustada no potenciômetro de referência. Acione o LED\_GREEN com a ventoinha.
  - O controle deve ser feito na ventoinha, ou seja, ela deve ligar (12V) ou desligar (0V) para manter a temperatura dentro do valor especificado.
  - Monitore a temperatura via comunicação serial.



```
#include "mbed.h"
AnalogIn    LM35(PA_0);
AnalogIn    POT(PA_1);
DigitalOut  dir_1(PB_10);
DigitalOut  dir_2(PB_4);
DigitalOut  led(LED1);
DigitalOut  rele(PC_7);
PwmOut      fan(PA_8);
Ticker      tick;
Serial      PC(USBTX, USBRX);
int aux = 0; //variável global
void interrup(){
    aux = 1;
}
int main(){
    int Acao=0;
    float T=0.2, Temp=0.0;
    float Erro = 0.0, Ref = 0.0;
    dir_1=1;
    dir_2=0; //Direção da ponte H
    fan=0.0;
    fan.period(0.0001);
    led=0;
    rele=1;
```

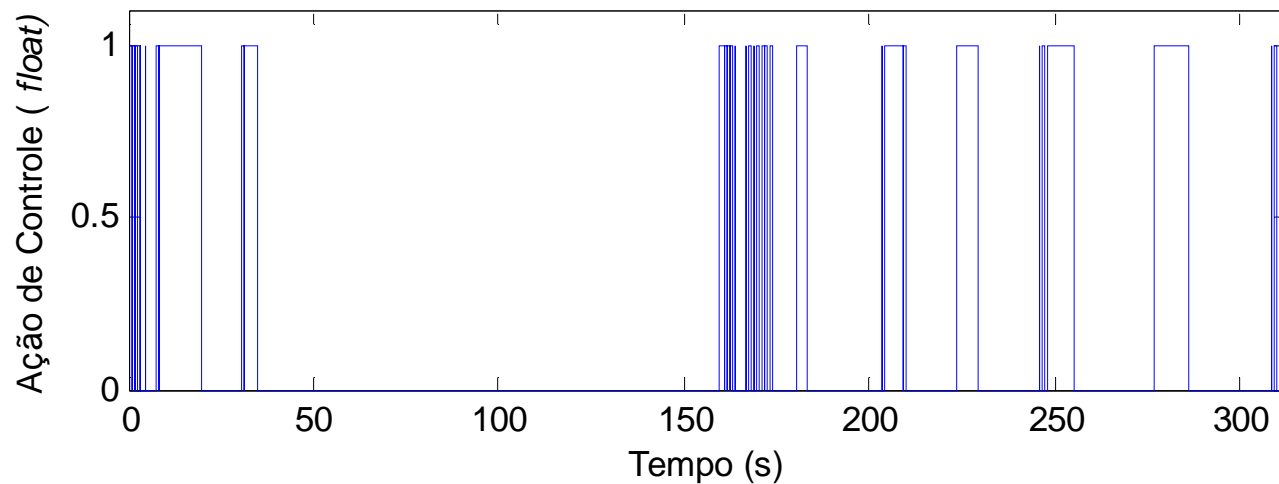
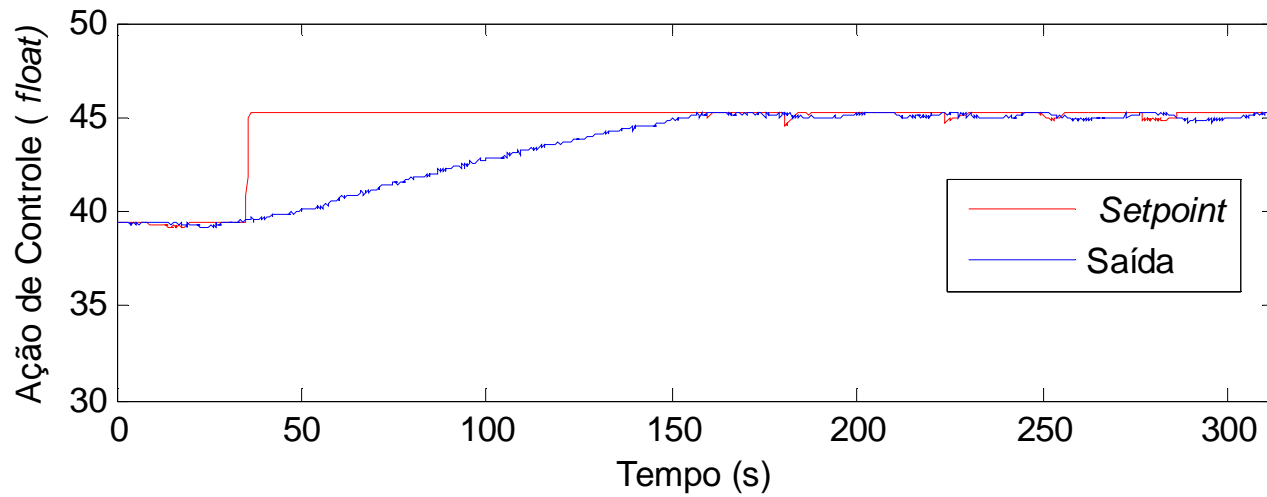
```
    tick.attach(&interrup, T); //prepara timer de T seg.
    while(1)
    {
        if (aux==1)
        {
            aux=0;
            Ref = 20*POT+30; //Ref. varia de 30oC a 50oC com o POT
            Temp=LM35*330.0; //Converte leitura para oC
            Erro=-(Ref-Temp); //=(Temp-Ref) Ação direta-refrigeração
            if(Erro > 0) {
                fan = 1.0; Acao = 1;
            } else {
                fan = 0.0; Acao = 0;
            }
            led = Acao;
            PC.printf("%d \t %2.1f \t %2.1f\r\n", Acao,
                    Ref, Temp);
        }
    }
}
```



# Resposta do sistema a um degrau

Dados obtidos pela interface do TeraTerm, plotados no Matlab.

## Controle ON-OFF Automático

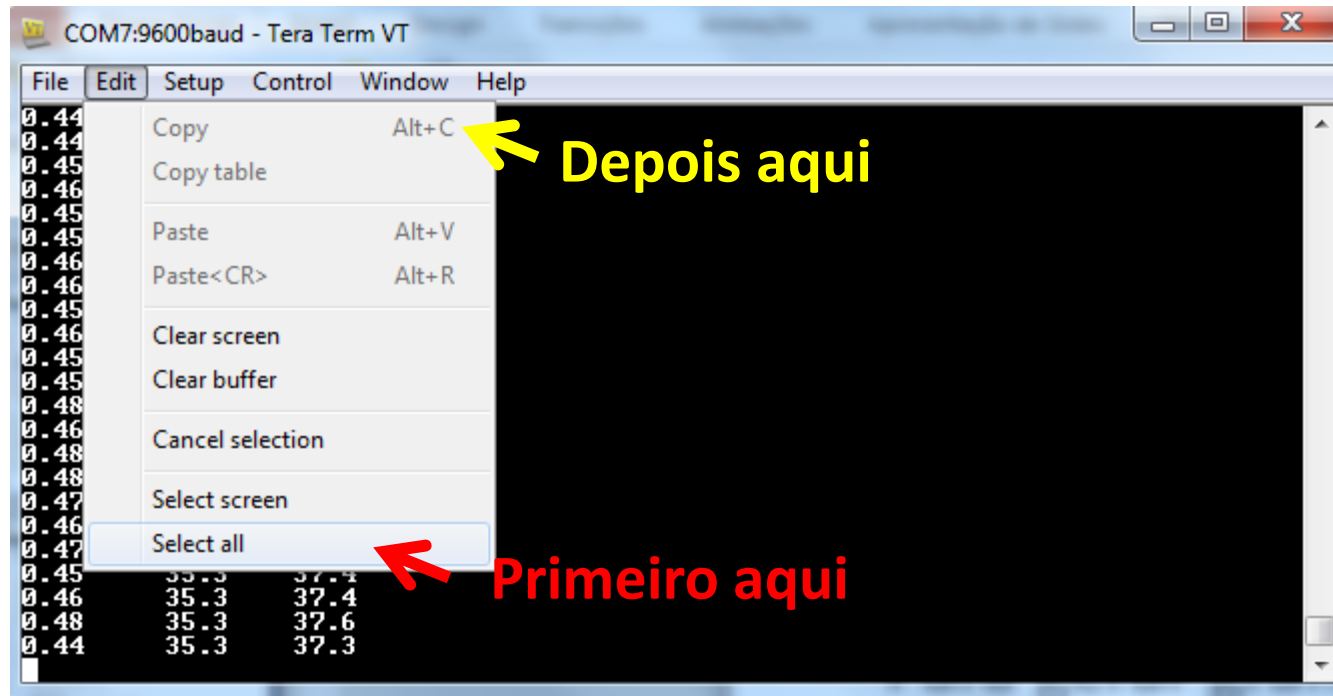






# Capturando dados para registro e análise

- Para gerar gráficos de resposta, pode-se copiar a tela do TeraTerm e colar o resultado em um programa como o Excel, Matlab, Origin, LibreOffice, Python entre outros.



- Lembre-se de acionar “Clear screen” e “Clear buffer” para limpar a tela entre ensaios.



# Atividade 3

- Atividade 3: Controle ON-OFF com histerese
  - Repita a Atividade 2, mas considerando uma alteração na lógica de controle para criar um intervalo diferencial de 1 grau em torno da temperatura ajustada no potenciômetro de referência.



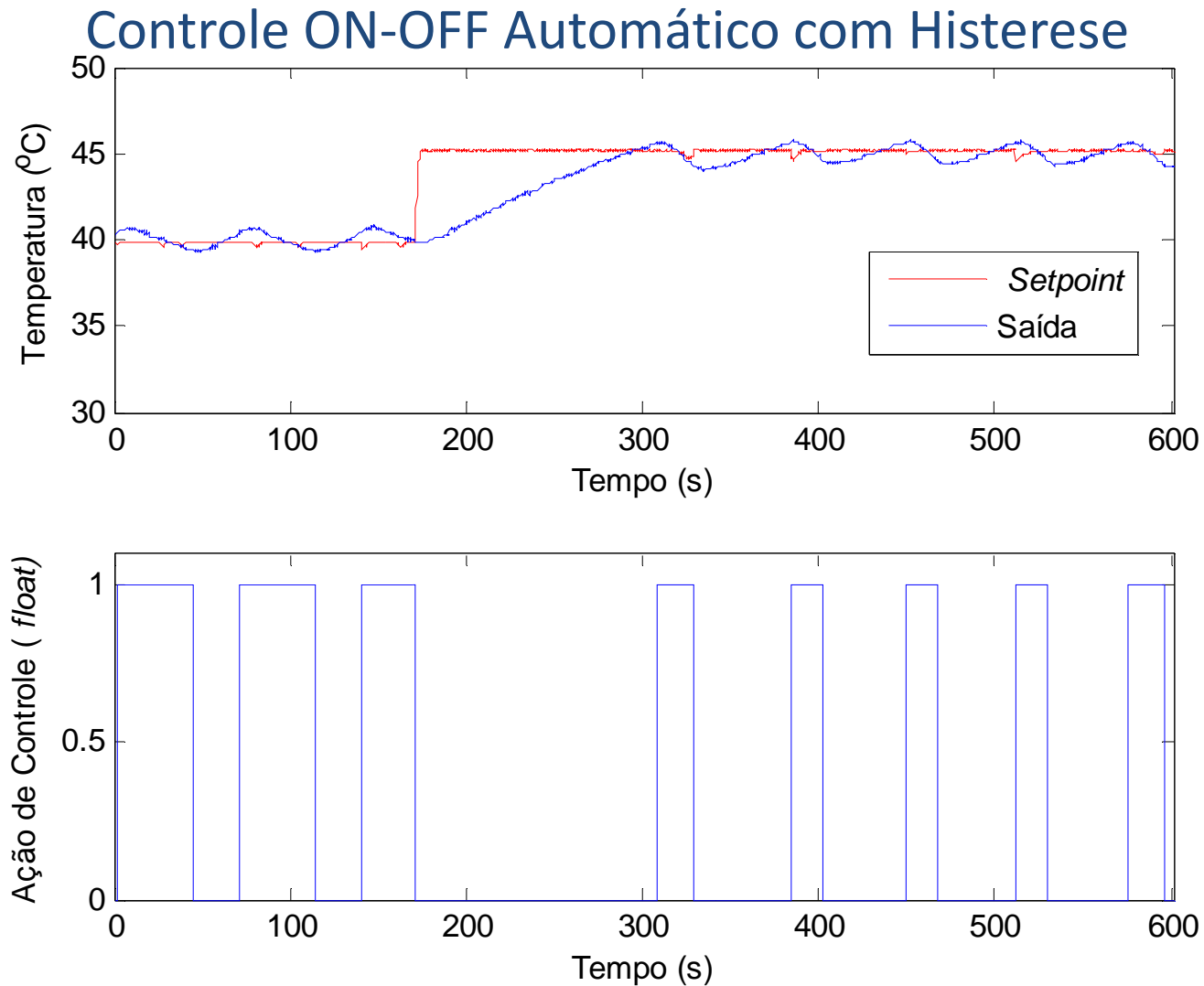
```
#include "mbed.h"
AnalogIn    LM35(PA_0);
AnalogIn    POT(PA_1);
DigitalOut  dir_1(PB_10);
DigitalOut  dir_2(PB_4);
DigitalOut  led(LED1);
DigitalOut  rele(PC_7);
PwmOut      fan(PA_8);
Ticker      tick;
Serial      PC(USBTX, USBRX);
int aux = 0; //variável global
void interrup(){
    aux = 1;
}
int main(){
    int Acao=0;
    float T = 0.2, D_Temp = 0.5;
    float Temp=0.0, Erro = 0.0, Ref = 0.0;
    dir_1=1;
    dir_2=0; //Direção da ponte H
    fan=0.0;
    fan.period(0.0001);
    led=0;
    rele=1;
```

```
    tick.attach(&interrup, T); //prepara timer de T seg.
    while(1) {
        if (aux==1) {
            aux = 0;
            Ref = 15*POT+35; //Referencia varia de
                               //35oC a 50oC ao
                               //variar o POT
            Temp=LM35*330.0; //Converte leitura
                               //para oC
            Erro = -(Ref - Temp); //Ação direta
                                   //refrigeração
            if(Erro > D_Temp) {
                fan = 1.0; Acao = 1;
            } else if (Erro < -D_Temp) {
                fan = 0.0; Acao = 0;
            }
            led = Acao;
            PC.printf("%d \t %2.1f \t %2.1f\r\n",
                    Acao, Ref, Temp);
        }
    }
}
```



# Resposta do sistema a um degrau

Dados obtidos pela interface do TeraTerm, plotados no Matlab.





# Um controlador proporcional

- Até agora as estratégias de controle são descontínuas, ou seja, o ventilador liga com 100% de PWM ou desliga (0% de PWM).
- Seria possível uma estratégia de controle contínua, finamente ajustável?
- A intuição nos diz que se pode ter um estratégia de controle, de forma que o sinal de saída do controlador (variável manipulada), que será a entrada do processo, seja proporcional ao erro:

$$u[n] = K_p e[n]$$

- Isso é denominado **controle proporcional (P)**.  $K_p$  é denominado ganho proporcional.



# Atividade 4

- Atividade 4: Controle P
  - Faça um controlador P que para manter a temperatura em um valor ajustado no potenciômetro de referência.
  - Algumas observações:
    - Recomenda-se somar um *offset* na ação de controle, pois a ventoinha não gira quando o *duty-cycle* do PWM é inferior a  $\sim 0,2$  a  $\sim 0,3$ .
    - A ventoinha também possui uma *histerese* no acionamento, por conta do atrito estático e dinâmico de sua hélice. Isso dificulta uma ação de controle linear.
    - O sensor não é o mais adequado para medir temperatura ambiente.
    - Será necessário ligar um LED em uma porta PWM.



```
#include "mbed.h"
AnalogIn LM35(PA_0);
AnalogIn POT(PA_1);
DigitalOut dir_1(PB_10);
DigitalOut dir_2(PB_4);
PwmOut led(PB_6);
DigitalOut rele(PC_7);
PwmOut fan(PA_8);
Ticker tick;
Serial PC(USBTX, USBRX);
int aux = 0; //variável global
void interrup(){
    aux = 1;
}
int main(){
    float T = 0.2, Temp=0.0, Erro = 0.0, Ref = 0.0, Acao=0.0, Kp;
    dir_1=1; dir_2=0; //Direção da ponte H
    fan=0.0; fan.period(0.0001);
    led=0;
    rele=1;
    Kp = 0.5; //Controle P
    tick.attach(&interrup, T); //prepara timer de T seg.
```

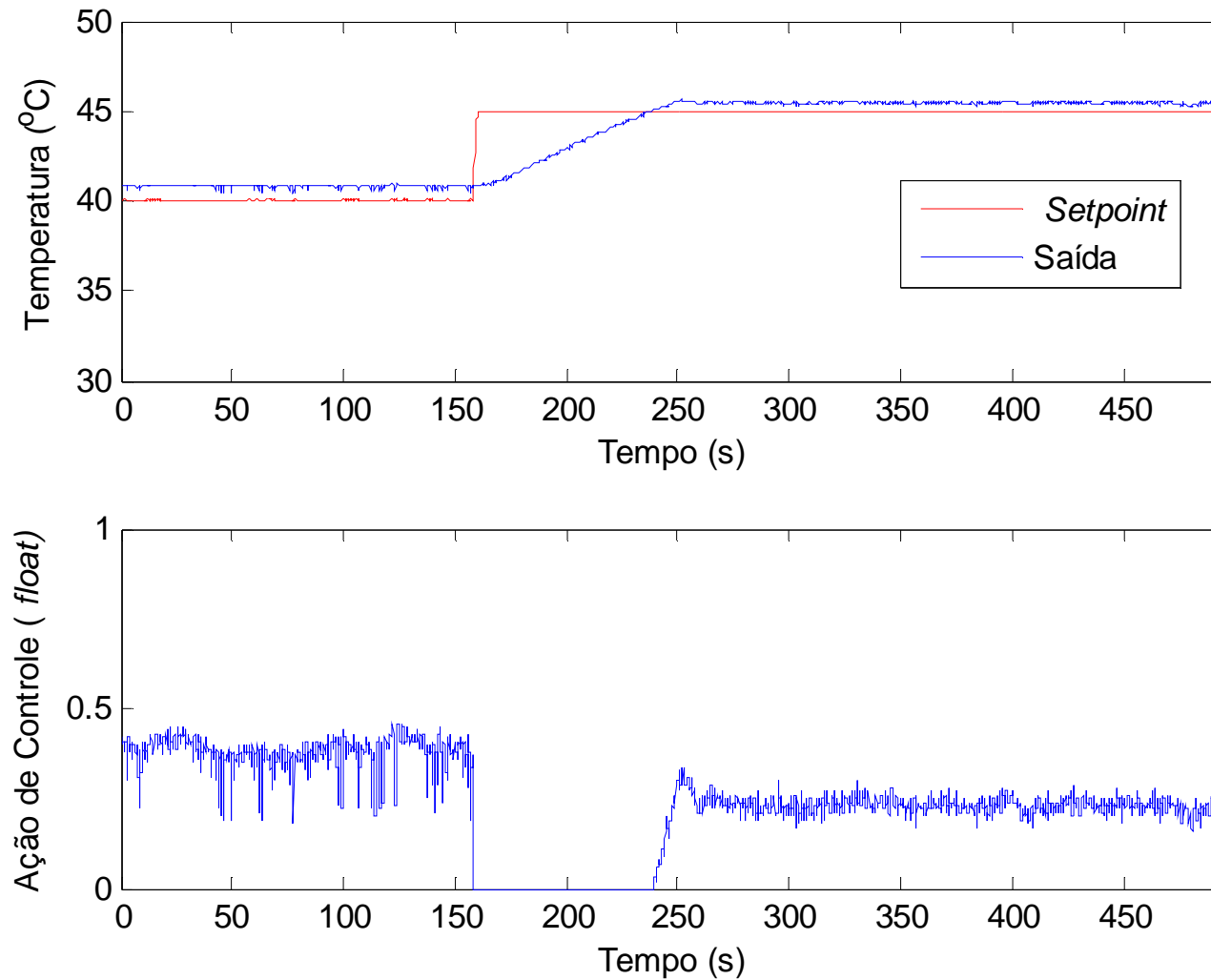
```
while(1) {
    if (aux==1) {
        aux = 0;
        Ref = 15*POT+35; //Referencia varia de 35oC a 50oC ao
        variar o POT
        Temp=LM35*330.0; //Converte leitura para oC
        Erro = -(Ref - Temp); //Ação direta - refrigeração
        Acao = Kp*Erro;
        // offset e limitação na Ação de Controle.
        if (Acao > 0.8) {
            Acao = 0.8;
        }
        else if (Acao < 0) {
            Acao = 0;
        }
        fan = Acao+0.20;
        led = fan;
        PC.printf("%.2f \t %2.1f \t %2.1f\r\n", Acao, Ref, Temp);
    }
}
}
```



# Resposta do sistema a um degrau

Dados obtidos pela interface do TeraTerm, plotados no Matlab.

## Controle P







# Observações do controlador proporcional

- Observe que apareceu um erro em regime permanente. Mesmo após vários minutos, a temperatura não se estabiliza exatamente no valor desejado!
- Como esse erro pode ser reduzido/eliminado?
- A intuição ainda nos diz que se o  $K_p$  aumentar, o erro tende a diminuir. Faça o teste!
- Analise:
  - ... o que aconteceu com a temperatura medida?
  - ... o que aconteceu com o sinal na saída do controlador (variável manipulada)?



# Um controlador proporcional - integral

- Para solucionar esse problema de uma forma mais eficiente, podemos pensar em uma ação que, de alguma forma, corrija o erro acumulado até o instante  $n$ . Uma forma de fazer isso é considerar:

$$u[n] = K_i \sum_{k=0}^n e[k]T$$

- $K_i$  é o ganho integrativo e  $T$  o período de amostragem.
- Ao considerar as parcelas **P + I**, tem-se:

$$u[n] = K_p e[n] + K_i \sum_{k=0}^n e[k]T$$

- Este é o controle **Proporcional-Integral (PI)**.



- Observe que:

$$u[n] = K_p e[n] + K_i \sum_{k=0}^n e[k]T$$

$$- \quad u[n-1] = K_p e[n-1] + K_i \sum_{k=0}^{n-1} e[k]T$$

---

$$u[n] - u[n-1] = K_p (e[n] - e[n-1]) + K_i T e[n]$$

- Assim, chega-se a uma forma alternativa para o **PI**:

$$u[n] = u[n-1] + K_p (e[n] - e[n-1]) + K_i T e[n]$$



# Atividade 5

- Atividade 4: Controle PI
  - Faça um controlador PI que para manter a temperatura em um valor ajustado no potenciômetro de referência.



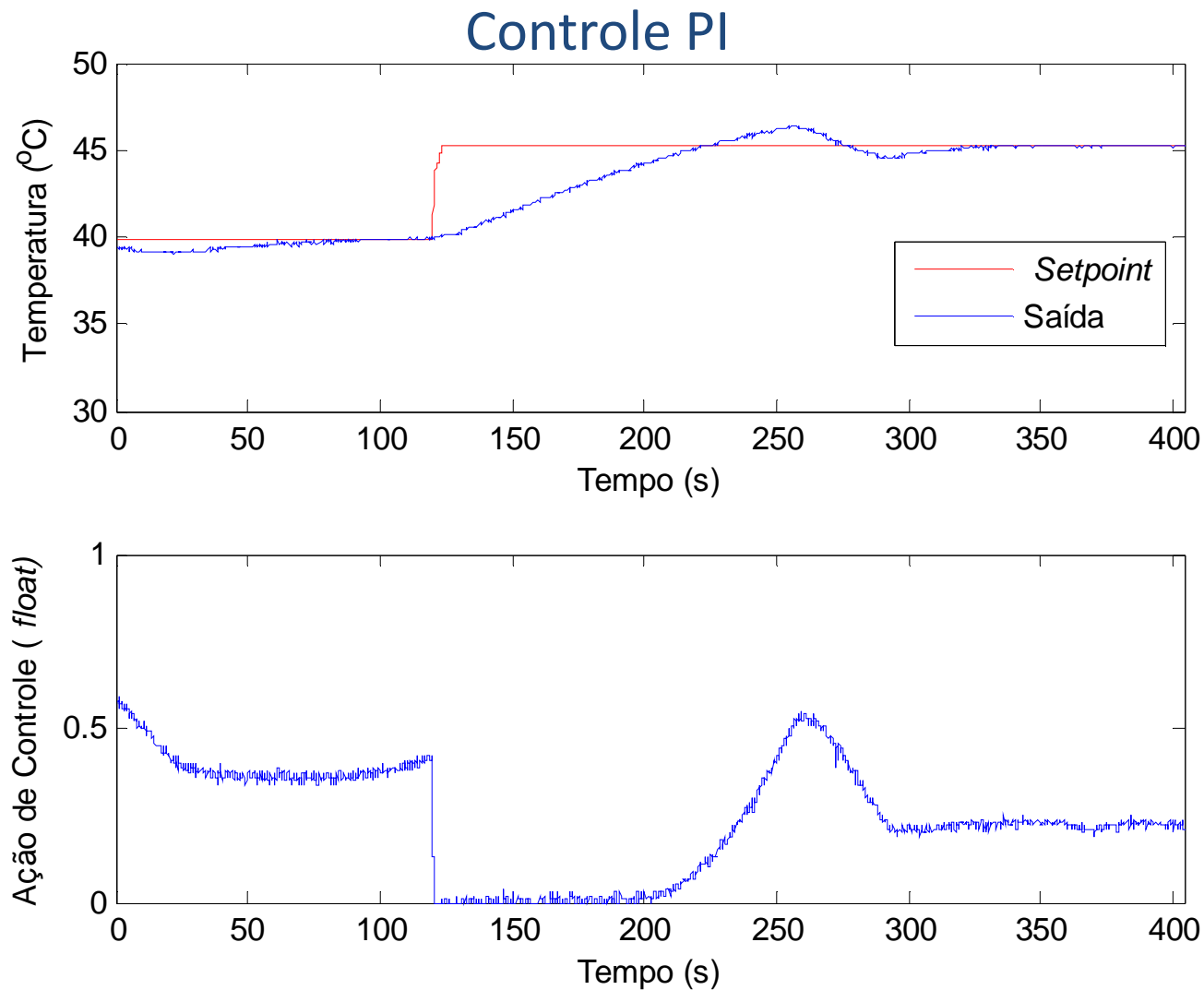
```
#include "mbed.h"
AnalogIn LM35(PA_0);
AnalogIn POT(PA_1);
DigitalOut dir_1(PB_10);
DigitalOut dir_2(PB_4);
PwmOut led(PB_6);
DigitalOut rele(PC_7);
PwmOut fan(PA_8);
Ticker tick;
Serial PC(USBTX, USBRX);
int aux = 0; //variável global
void interrup() {
    aux = 1;
}
int main() {
    float T = 0.2, Temp=0.0, Erro = 0.0, Ref = 0.0;
    float Acao=0, Acao_ant=0, Erro_ant=0.0, Kp, Ki;
    dir_1=1; dir_2=0; //Direcao da ponte H
    fan=0.0; fan.period(0.0001);
    led=0;
    rele=1;
    Kp = 0.2; Ki = 0.009; //Controle PI
    tick.attach(&interrup, T); //prepara timer de T seg.
```

```
while(1) {
    if (aux==1) {
        aux = 0;
        Ref = 15*POT+35; //Referencia varia de 35oC a 50oC ao
        variar o POT
        Temp=LM35*330.0; //Converte leitura para oC
        Erro = -(Ref - Temp); //Ação direta - refrigeração
        Acao = Acao_ant +Kp*(Erro - Erro_ant)+Ki*T*Erro;
        // offset e limitação na Ação de Controle.
        if (Acao > 0.8) {
            Acao = 0.8;
        }
        else if (Acao < 0) {
            Acao = 0;
        }
        fan = Acao+0.20;
        led = fan;
        PC.printf("%.2f \t %2.1f \t %2.1f\r\n", Acao, Ref, Temp);
        Erro_ant = Erro; Acao_ant = Acao;
    }
}
}
```



# Resposta do sistema a um degrau

Dados obtidos pela interface do TeraTerm, plotados no Matlab.





# Comentários Finais

- A temperatura ambiente influencia nos resultados.
- As plantas foram feitas buscando-se a uniformidade, mas pode haver variação de uma caixinha para outra.
- Sabote o seu sistema e veja os controladores respondendo às solicitações. Por exemplo: obstrua a entrada de ar frio. Obstrua a saída de ar quente.



# Comentários Finais

- Tente ajustar empiricamente os ganhos do controlador.
  - Varie o ganho  $K_p$  no controle proporcional. Analise os resultados.
  - Adicione a parcela integral e varie  $K_p$  e  $K_i$ . Analise os resultados.
  - Qual a melhor estratégia de controle?