

Sistemas Embarcados

PROF. JOSENALDE OLIVEIRA

TADS UFRN

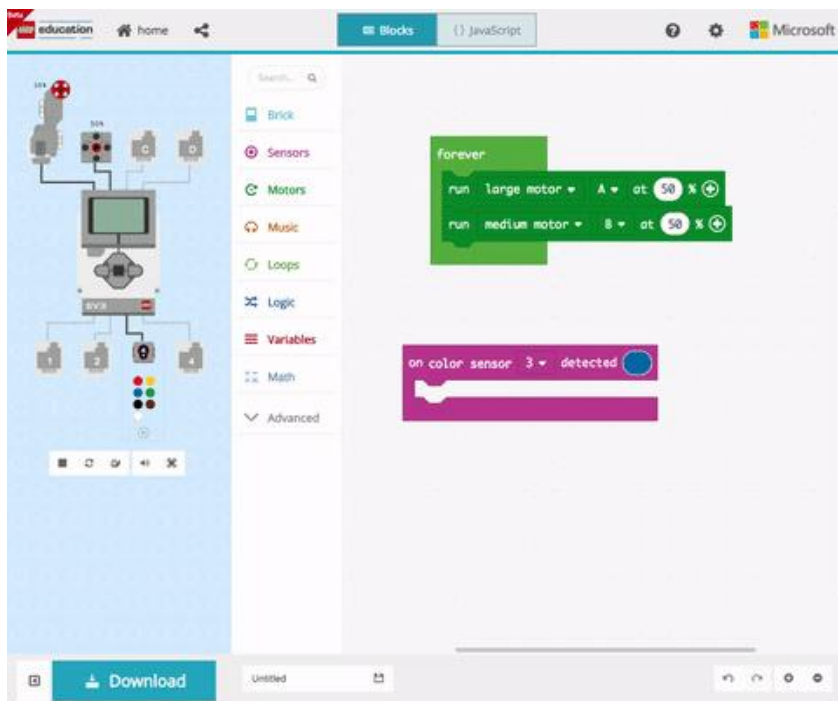
josenalde@eaj.ufrn.br

<https://github.com/josenalde/embeddedsystems>

Sistemas de Controle Automático



O objetivo de um sistema de controle consiste em aplicar sinais adequados na **entrada de controle** a fim de fazer com que o sinal de saída apresente um comportamento pré-especificado (requisitos), e que o efeito da ação das perturbações sobre este comportamento seja minimizado ou mesmo completamente eliminado.



Conceitos:

PROCESSO ou PLANTA: sistema a ser controlado (G)

SINAL DE CONTROLE ou VARIÁVEL MANIPULADA (MV): sinal a ser aplicado na entrada da PLANTA (u)

VARIÁVEL CONTROLADA ou VARIÁVEL DE PROCESSO (PV): saída do processo o que se deseja controlar (y)

REFERÊNCIA OU SET POINT: valor desejado (target) para PV (r ou sp)

PERTURBAÇÃO: eventos internos e/ou externos que influenciam a MV e/ou PV (d – disturbance) – ruídos eletromagnéticos, de medição etc. também podem ser considerados

Sistemas de Controle Automático

CONFIGURAÇÕES:

MALHA ABERTA:

- Sinal de controle predeterminado, imprecisão;
- Não rejeita perturbações externas;
- Não necessita sensores, pois não há uso de feedback, mais barato e simples (ex: micro-ondas, máquina de lavar Cafeteira etc.)
- Sensores para monitoramento podem ser aplicados

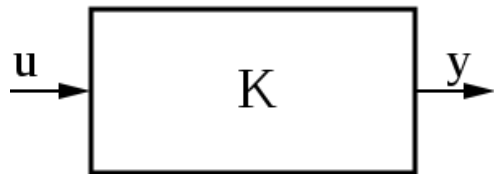
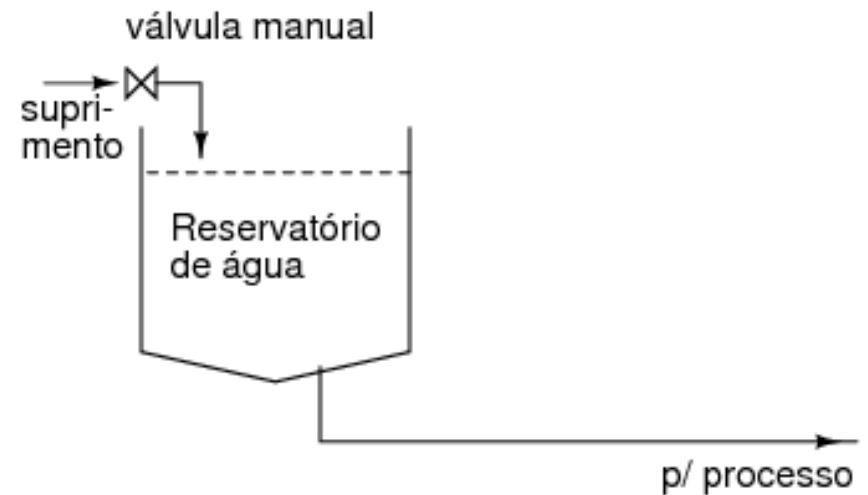
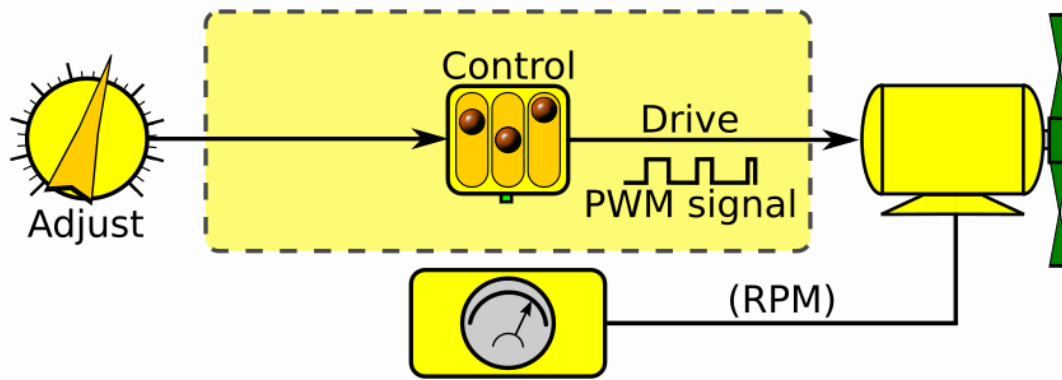


Diagrama de blocos em malha aberta (open loop)



Sistemas de Controle Automático

CONFIGURAÇÕES:

MALHA FECHADA: informações sobre como a saída (medida) do processo está evoluindo são utilizadas para determinar o sinal de controle a cada instante de tempo. Este processo de usar a saída para corrigir a entrada comparando com o set point é chamado **realimentação**. Em geral o sinal de controle é de baixa corrente, sendo necessário elemento atuador, como válvulas proporcionais, resistências, drivers de motores etc.

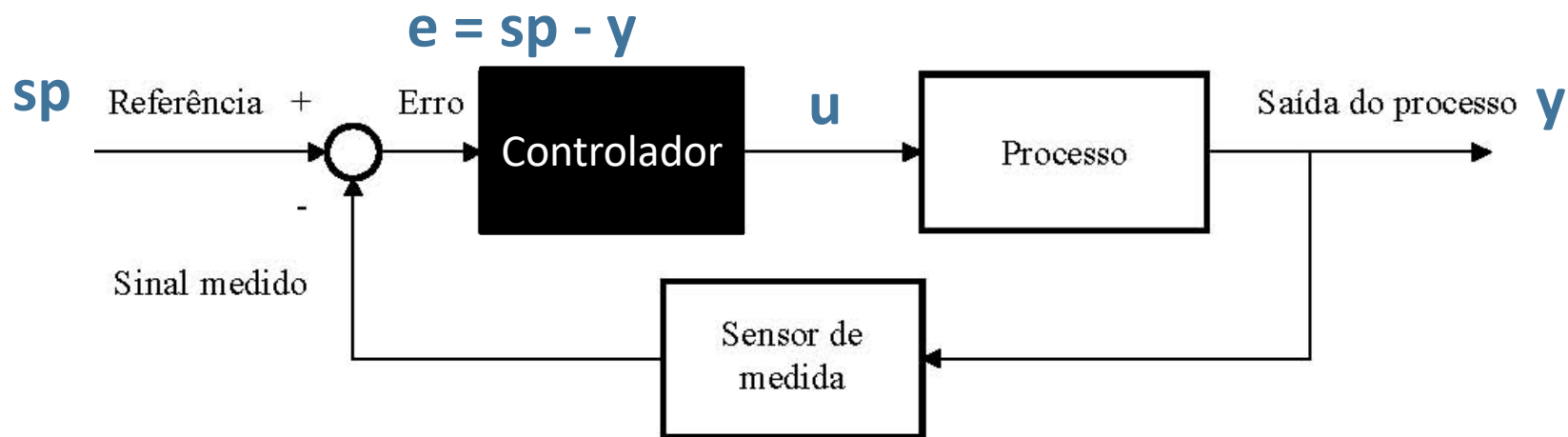


Diagrama de blocos malha fechada (closed loop)

Embora o Controlador possa ser implementado via circuitos eletrônicos, no contexto de **sistemas embarcados** este bloco representa um **algoritmo computacional**, no denominado Controle Digital, que pode estar implementado desde um desktop comum à plataformas embarcadas

Sistemas de Controle Automático

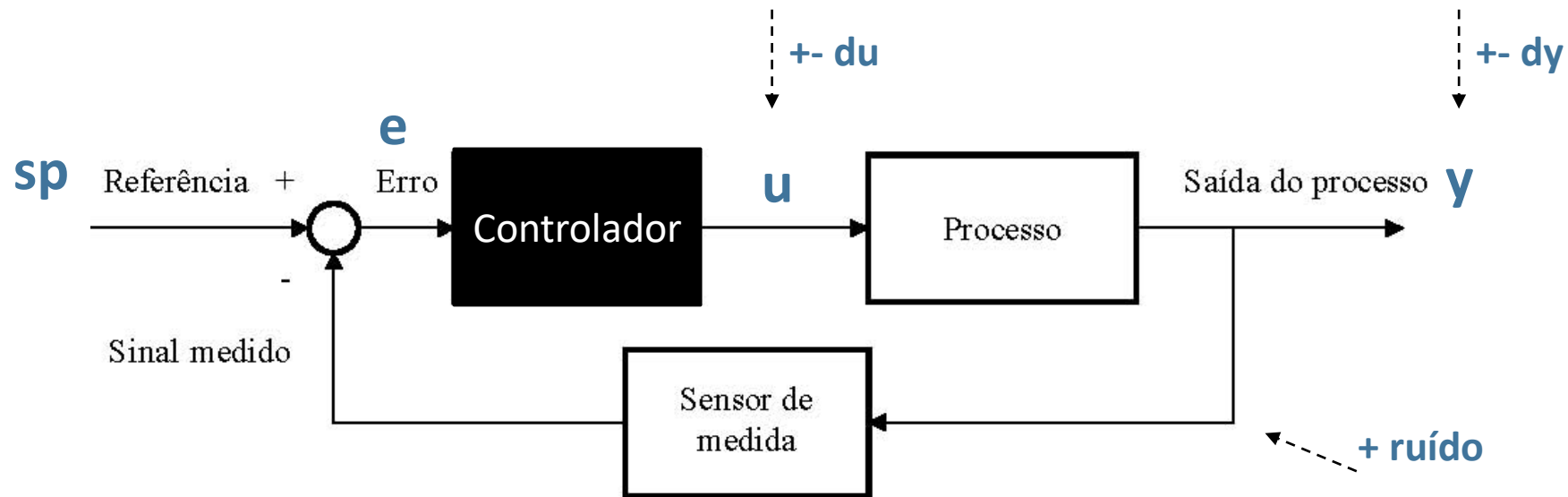
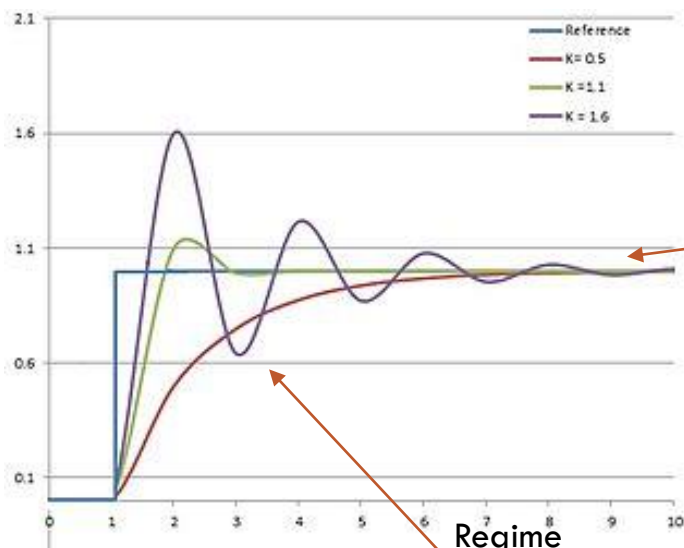


Diagrama de blocos malha fechada (closed loop)

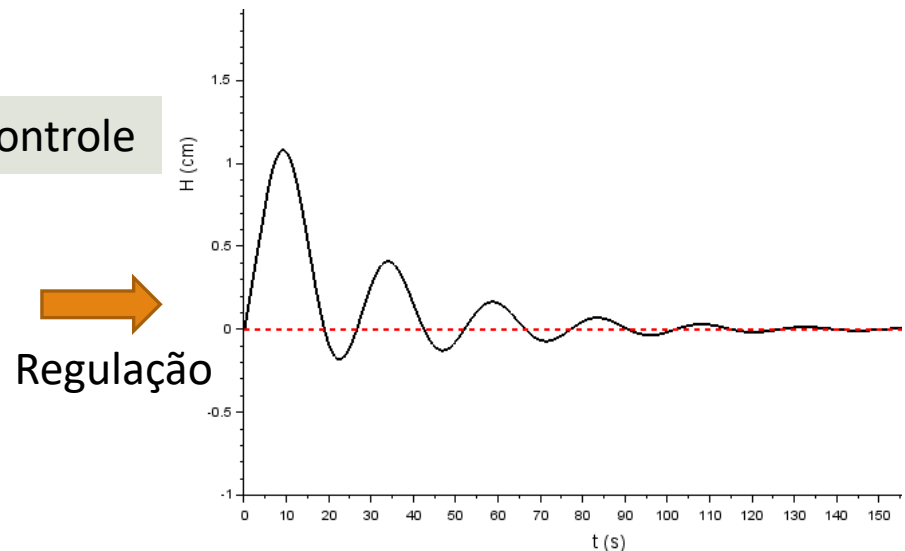


Curvas típicas em controle

Regime
Permanente

Rastreamento
Tracking

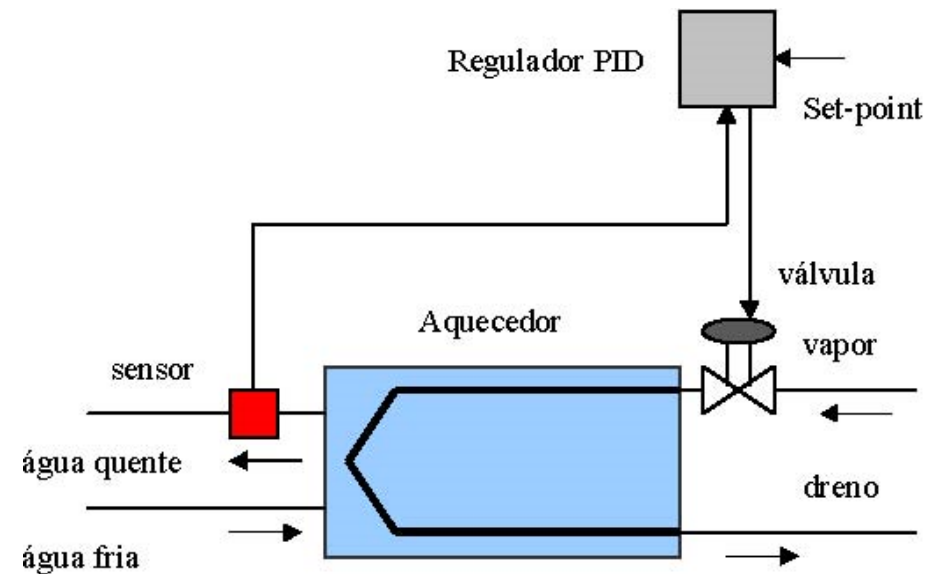
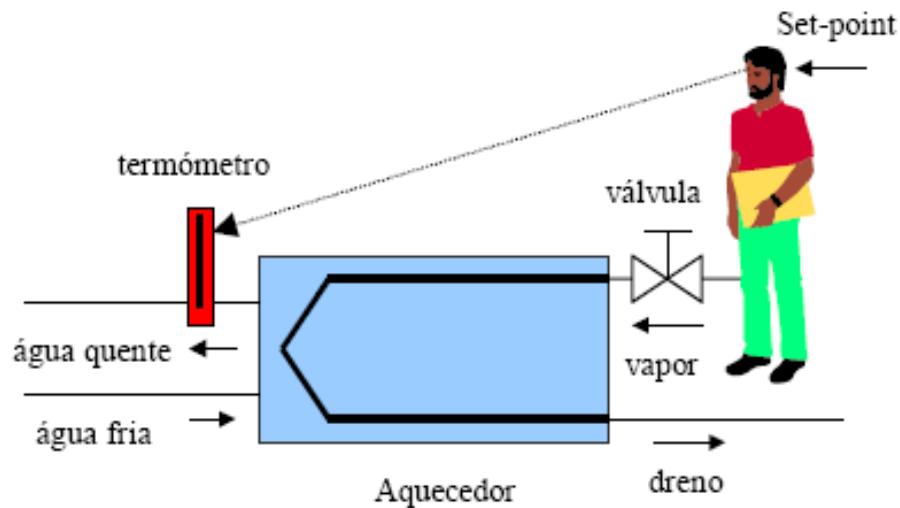
Regime
Transitório



Regulação

Sistemas de Controle Automático

EXEMPLO EM MALHA FECHADA:



Sensor TT:
Transmissor de Temperatura



Controlador
CLP



Atuador
Relé/Pneumático



Sistemas de Controle Automático

OBS: sobre comparação SETPOINT, FEEDBACK: os valores devem estar na mesma unidade. Exemplo: num controle de velocidade de um motor elétrico, o sensor tacômetro possui ganho (relação) de 10 mV/rpm. No display (frontend) do controlador, o usuário iria definir setpoint de 1500 rpm, mas internamente o valor do sensor (em volts) será comparado com **1500 rpm x fator, ou seja, 1500 x 10 mV/rpm = 15V.**

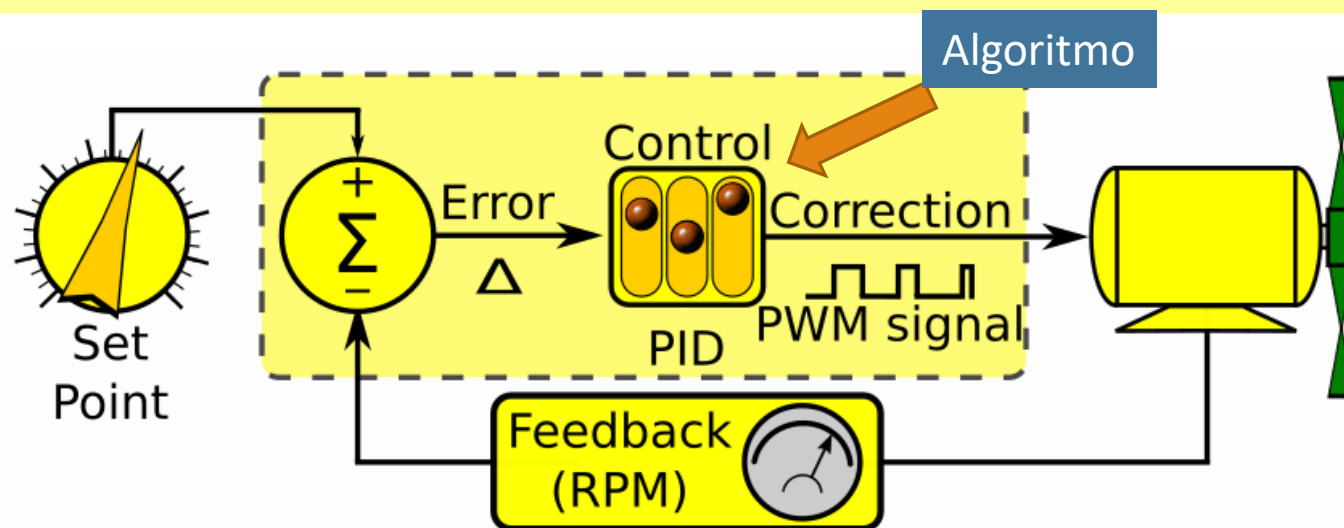
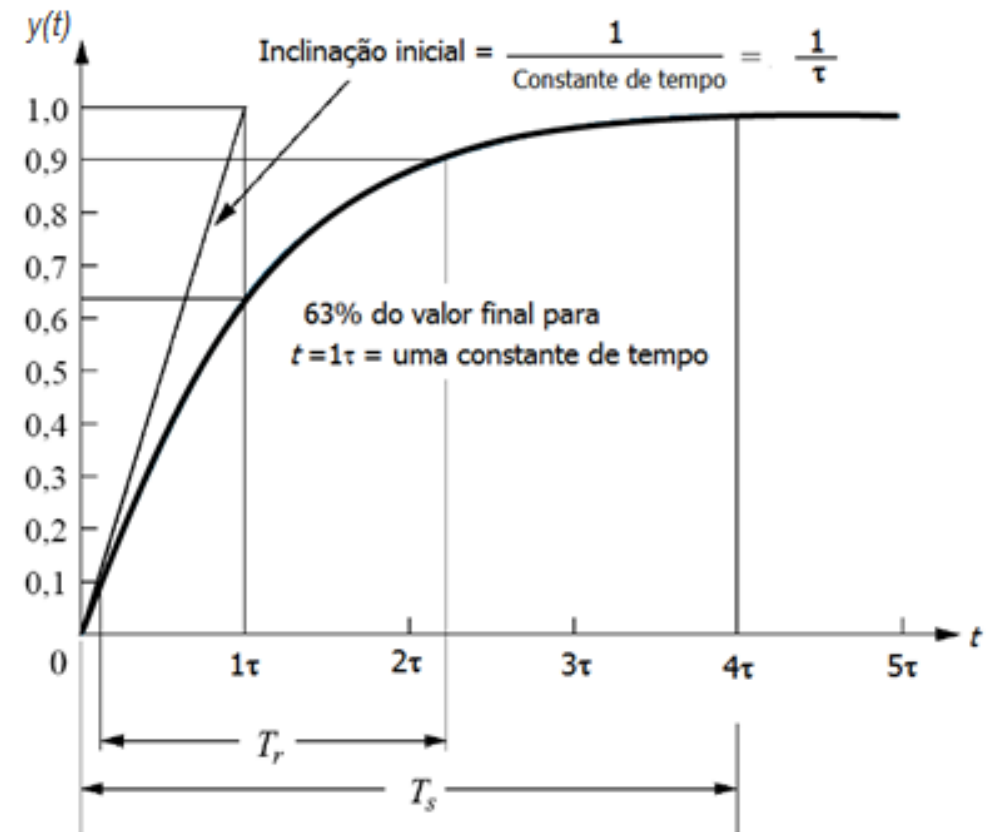
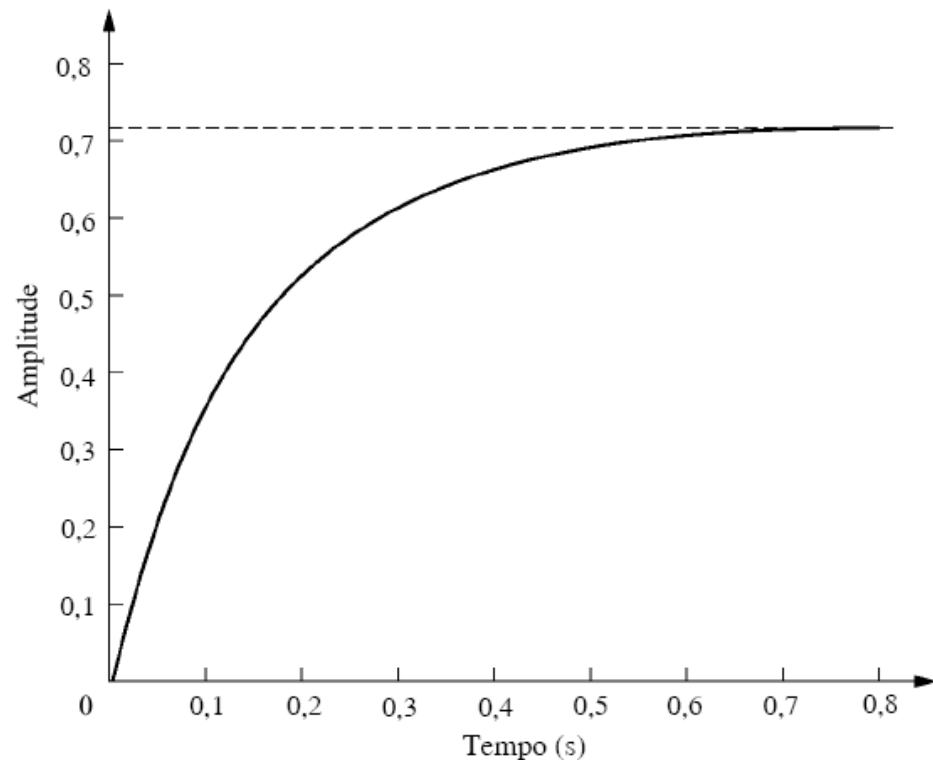


Diagrama ilustrativo: controle de velocidade de motor

Sistemas de Controle Automático

Respostas típicas de sistema: ordem 1 (térmico, nível ...): comportamento exponencial

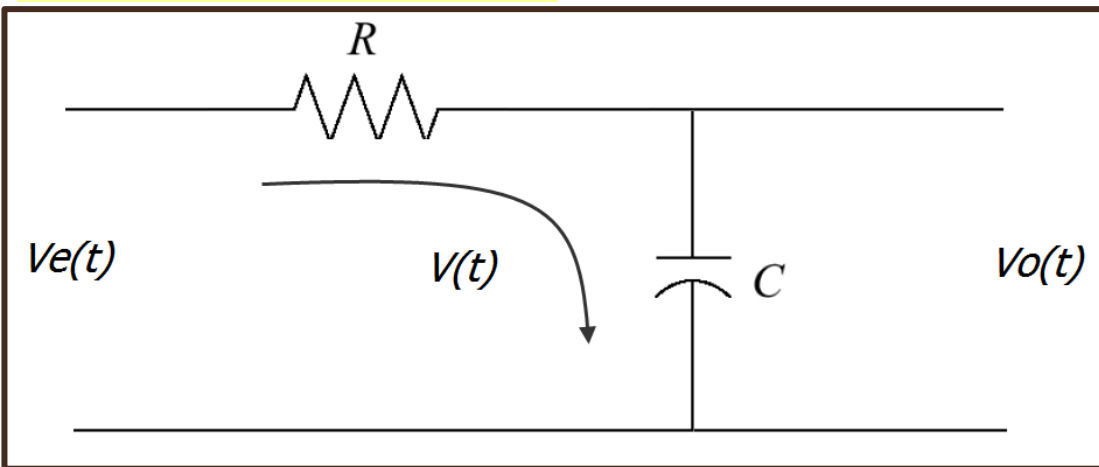


T_s é chamado tempo de estabilização, aproximadamente 4 constantes de tempo

Sistemas de Controle Automático

Respostas típicas de sistema: ordem 1 (térmico, nível ...):
polinômio no denominador de grau 1

Exemplo: circuito RC



Carga $V(t) = E(1 - e^{-t/RC})$

Descarga $V(t) = Ee^{-t/RC}$

t	E
τ	63,2%
2τ	86,5%
3τ	95%
4τ	98,2%
5τ	~100%

Tabela 1: carga sobre o capacitor para tempos múltiplos da constante de tempo

Função de Transferência $G(s)$: representa a relação Saída/Entrada de um sistema permite obter resposta em malha aberta e ajustar controlador para operação em malha fechada

$$\frac{Vo(s)}{Ve(s)} = G(s) = \frac{1}{RCs+1}, \tau = RC$$

O **s** representa que a função está no domínio da frequência e não no domínio do tempo t . No domínio da frequência, expressões complexas no domínio do tempo tornam-se multiplicações e divisões, sendo mais adaptadas à análise

Sistemas de Controle Automático

Simular em Python o Sistema de Ordem 1 RC: $1/(s + 1)$, com $R = 10K$ e $C = 100\mu F$

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{1}{s + 1}, \tau = 10 \times 10^3 \cdot 100 \times 10^{-6} = 10^0 = 1$$

Ou seja, o sistema em malha aberta atinge 63% do valor da entrada u em 1 segundo

<https://github.com/josenalde/embeddedsystems/blob/master/src/simul1.ipynb>

Para que o código seja compreendido, precisamos de conceitos matemáticos sobre equações diferenciais. Vamos transformar a expressão do domínio S para o domínio T . Para isto, adotemos as transformações:

$$s^n x = \frac{d^n}{dt} x, \text{ ou seja, para } n = 1, sx = \frac{dx}{dt} = \dot{x}(t)$$

$$\frac{1}{s} x = \int x dt$$

Transformações simplificadas, considerando todas as condições iniciais nulas = 0

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \rightarrow \tau s y + y = u \rightarrow \tau \dot{y} + y = u \rightarrow \dot{y} = \frac{1}{\tau} (u - y)$$

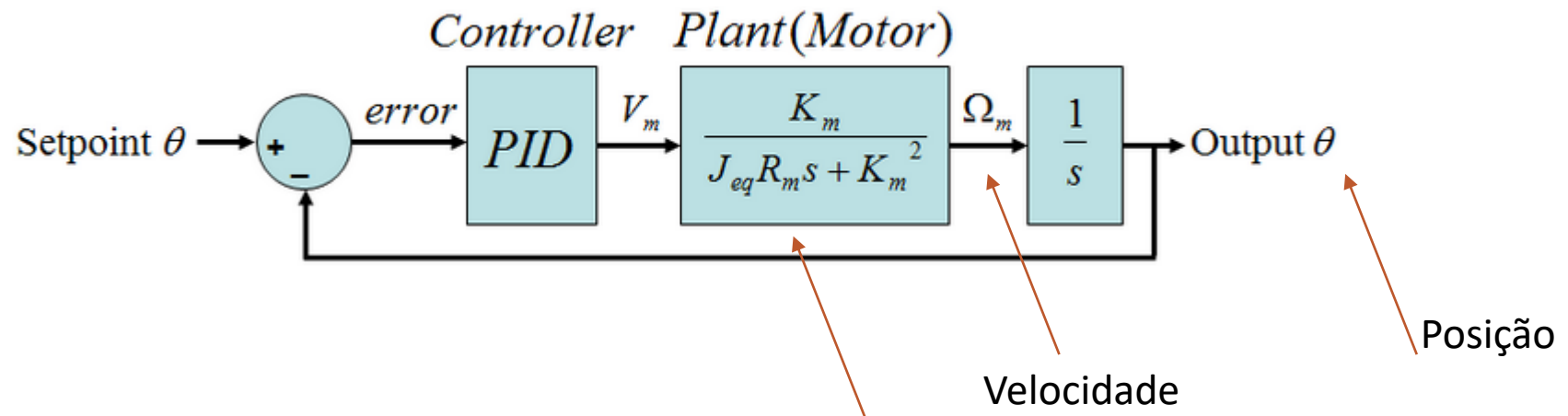
Como implementar uma aproximação computacional para a solução desta equação diferencial?

As raízes do polinômio de $G(s)$ definirá se o sistema será estável ou instável

Sistemas de Controle Automático

Sistemas de Controle Automático

Modelo físico de motor DC (Corrente Contínua) – parâmetros físicos



Onde:

V_m – Tensão aplicada (V)

Ω_m – Velocidade angular (rad/s) (converter para RPM)

K_m – constante do motor (V/rad/s)

$J_{eq} = J_m$ – momento de inércia da armadura (kg*m²)

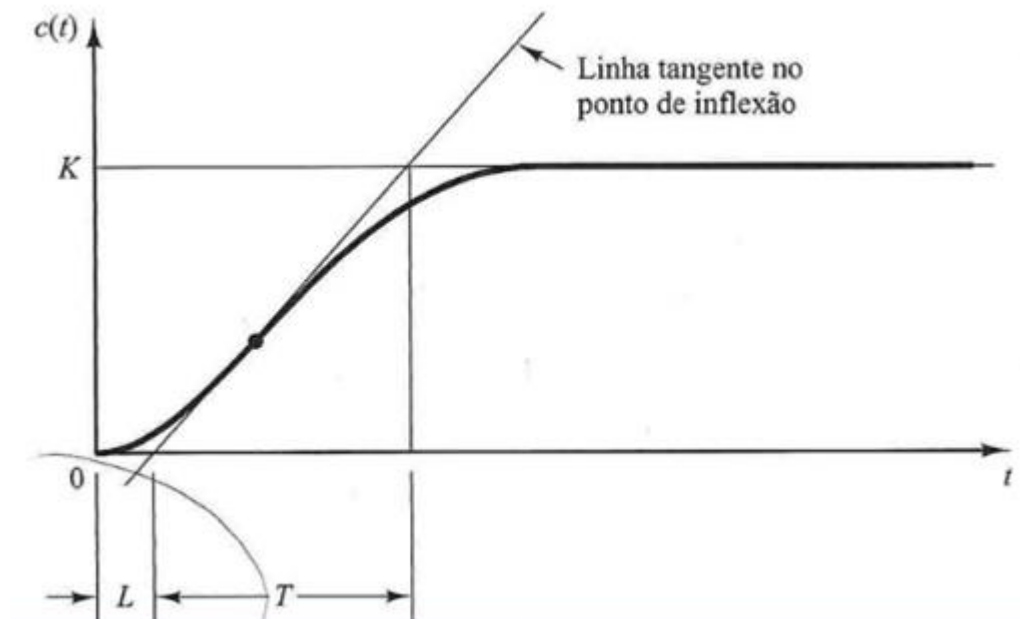
R_m – resistência da armadura do motor (ohms)

Se não há acesso aos parâmetros físicos, métodos de identificação - gráficos, regras, IA, ciência de dados etc.

Sintonia de controladores

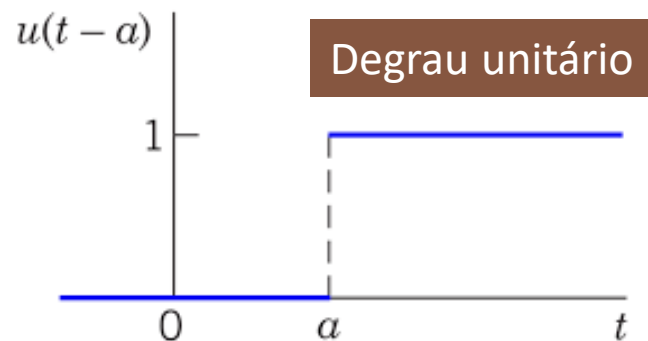
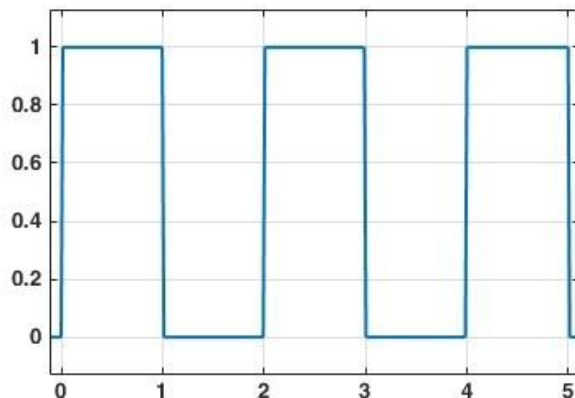
Métodos gráficos, por análise de entrada/saída, baseado em regras etc.

Exemplo: Método da resposta ao degrau



□ Proposta de Ziegler-Nichols

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

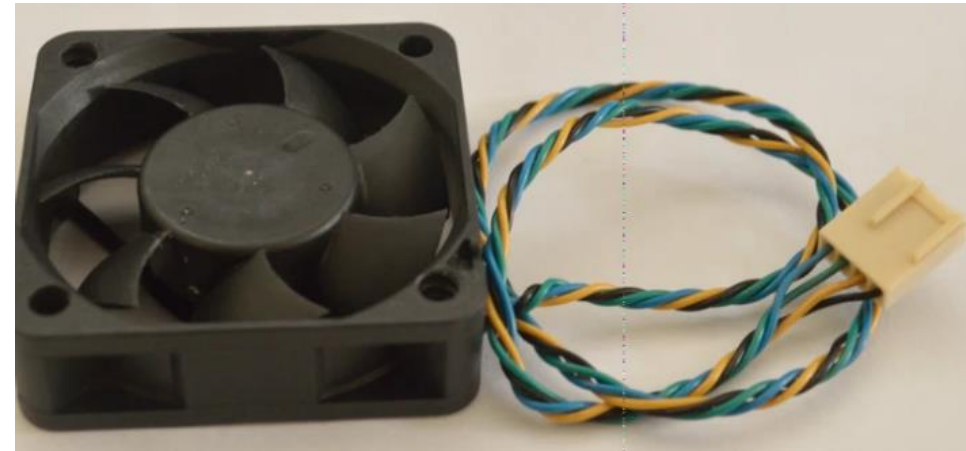
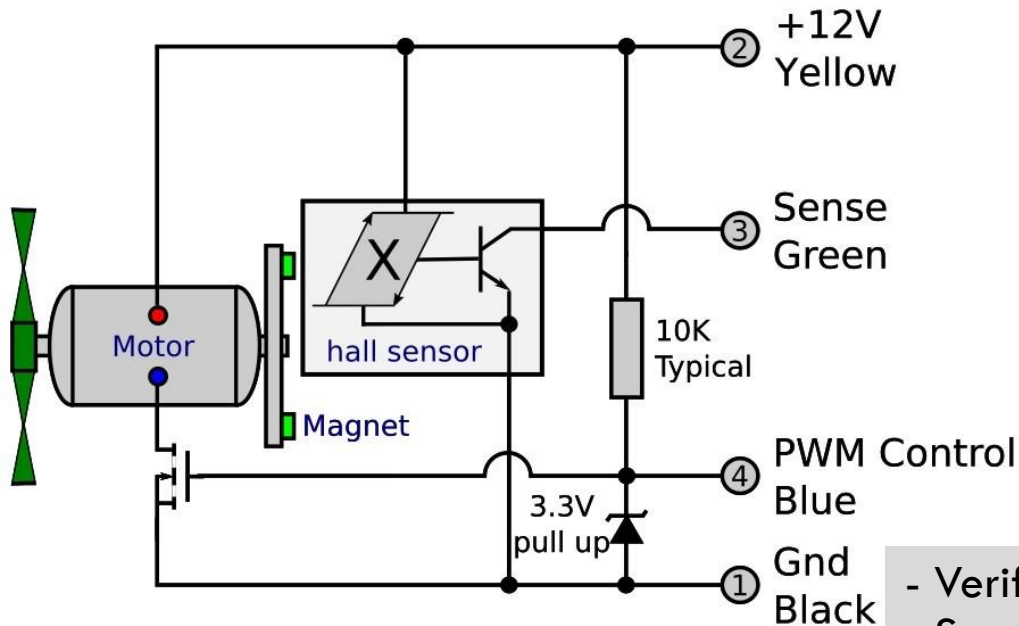


$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls}$$

Assume conhecida a estrutura, porém desconhece o valor dos parâmetros **K, T, L**

Exemplo de sistema para controle de velocidade

Circuito para medir velocidade de ventoinha de PC (DC motor)



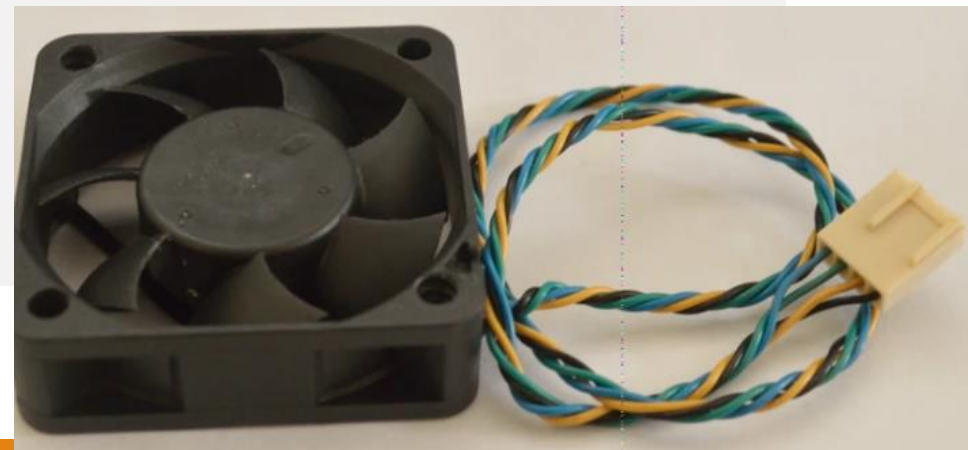
- Verificar sinal do sensor no osciloscópio
- Se usar Ventoinha de +12V, sinal do sensor deve ser reduzido para +5V, com regulador 7805, por exemplo.
- escrever código para medir velocidade
- aplicar sinal na entrada e registrar evolução da saída para gerar gráfico
- obter função de transferência
- projetar controlador
- definir setpoint (RPM) e efetuar controle de velocidade

Exemplo de sistema para controle de velocidade

Circuito para medir velocidade de ventoinha de PC (DC motor)

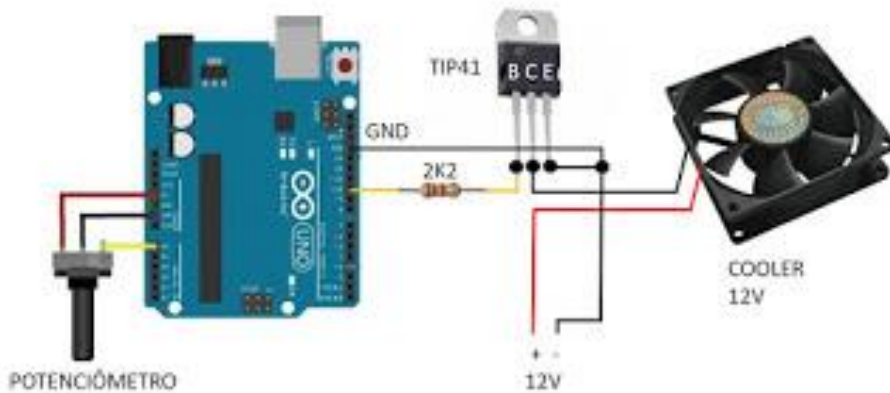
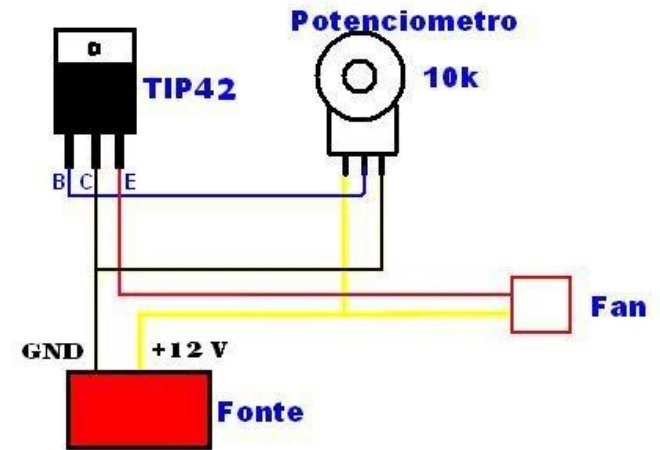
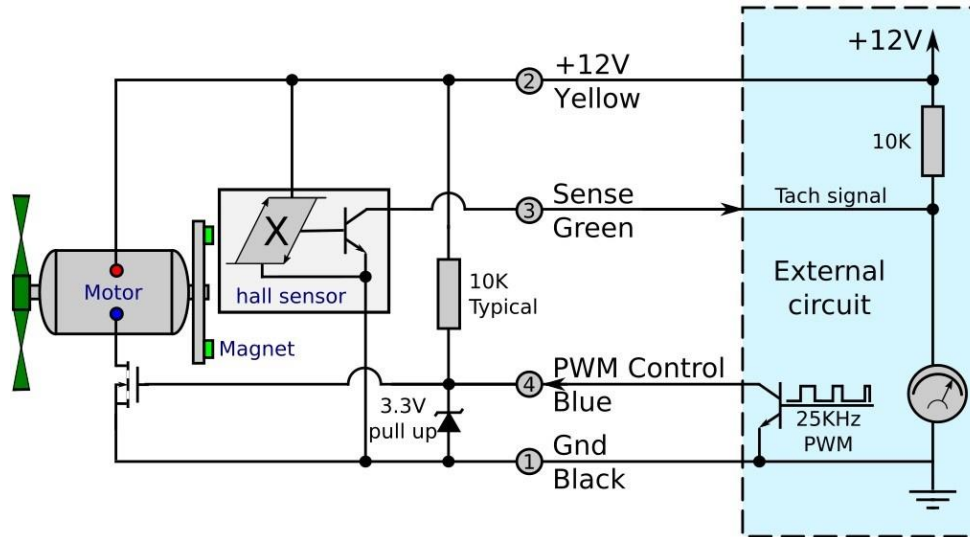
```
volatile int rpm;
unsigned long elapsedTime = 0;
int intervalTimer = 1000; // 1 milisegundo
void setup()
{
    Serial.begin(115200); // Inicia a Serial.
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), ctt, RISING); // Habilita a interrupção 0 no pino 2. UNO
    elapsedTime = millis();
}
void loop()
{
    if (millis() - elapsedTime >= intervalTimer) {
        Serial.print(rpm * 30); // Mostra o RPM.
        Serial.println(" RPM"); // Mostra o RPM.
        elapsedTime = millis(); // reset
        rpm = 0; // Reseta a variável para próxima leitura.
    }
    // Como estamos lendo a cada UM segundo, usaremos RPM*60 para determinar as rotações por minuto,
    // porém, como foi dito na explicação, é preciso dividir o valor por 2, por isto 30!
}

void ctt() // rotina de interrupção de serviço (isr)
{
    rpm++; // Incrementa a variável.
}
```



Exemplo de sistema para controle de velocidade

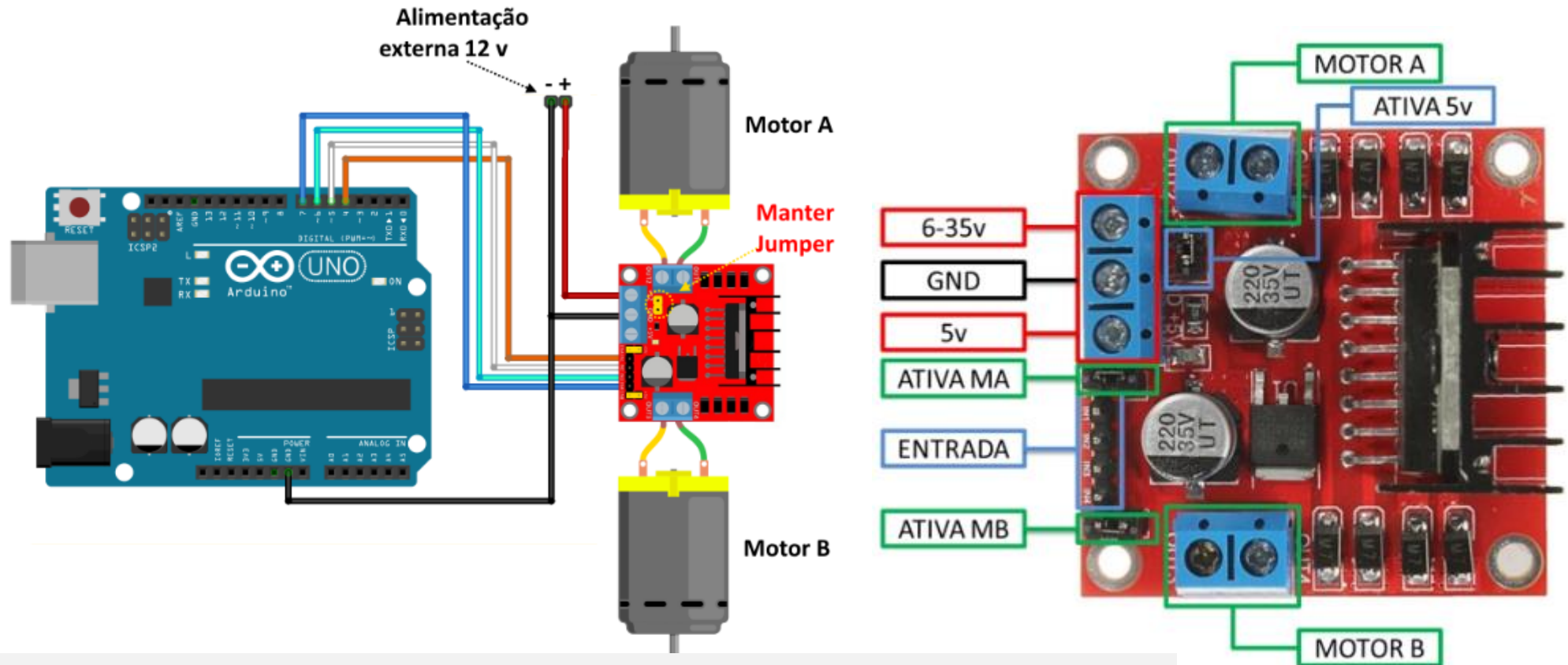
Circuito para medir velocidade de ventoinha de PC (DC motor)



3 Fios: ajuste manual ou via software sem feedback

Exemplo de sistema para controle de velocidade

Usando o módulo L298N como ATUADOR



No caso de ventoinha 12VDC, não ligar fio ao 5v do módulo ligar a fonte DC de bancada com 12V ao pino 6-35v e respectivo GND, o qual também deve ser ligado ao GND do microcontrolador. Manter jumper ATIVA MA.

O pino IN1 deve ser ligado ao pino PWM do microcontrolador e IN2 pode estar no GND, para girar sentido horário.