

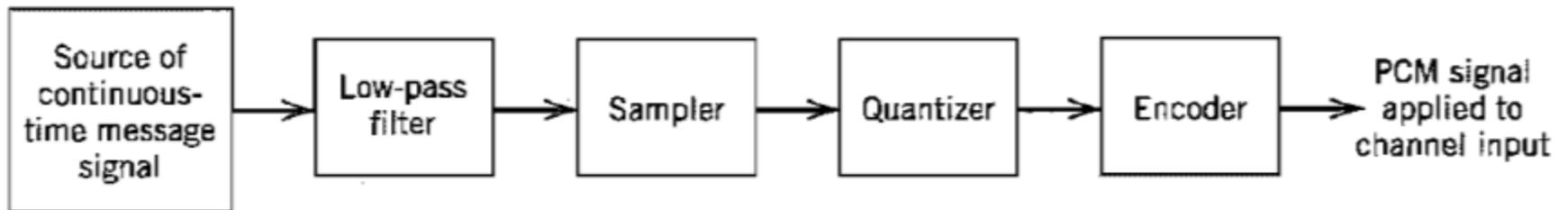
# Modulação por Pulsos



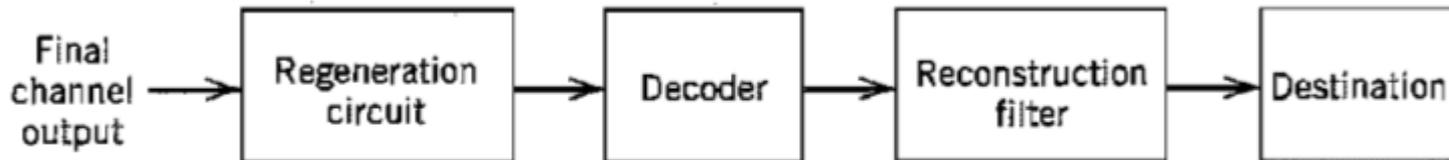
- Propriedades
- Amostragem de sinais
- Modulação por amplitude de pulso (PAM)
- Modulação por pulso codificado (PCM)
- Modulação por largura de pulso (PWM)
- Modulação por posição de pulso (PPM)
- Multiplexação por Divisão no Tempo (TDM)
- Exercícios de laboratório

# PCM

Demodulação: para recuperar o sinal analógico original são necessárias 3 etapas:



(a) Transmitter



(c) Receiver

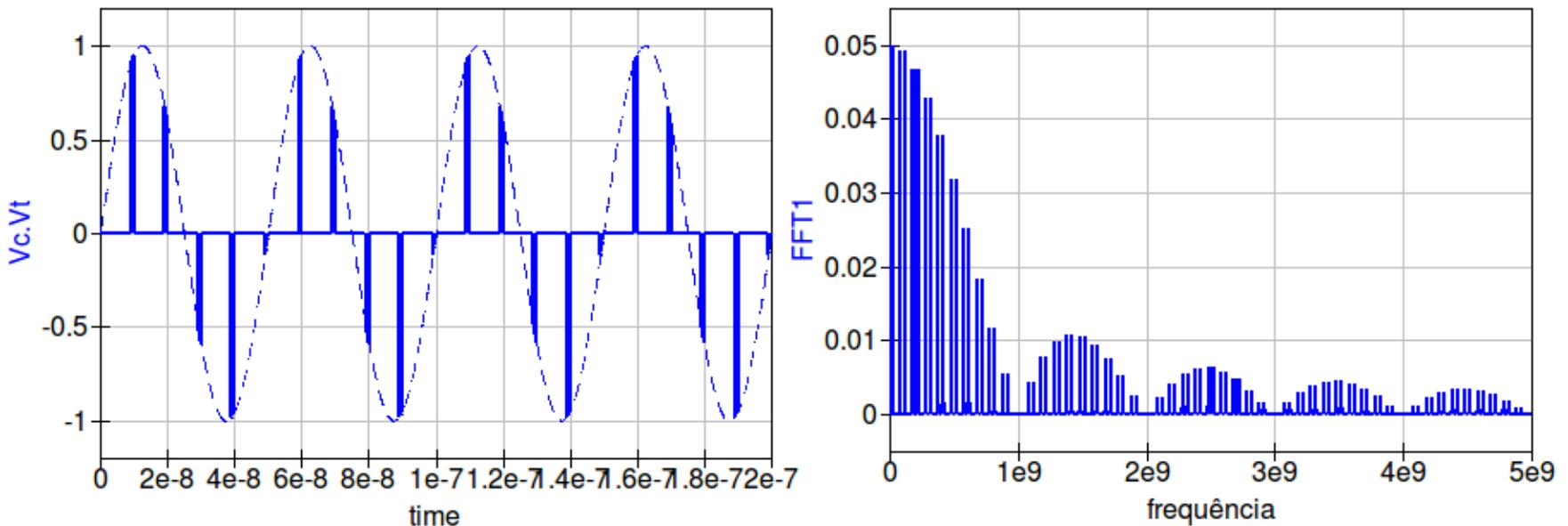
# PCM

Demodulação: para recuperar o sinal analógico original são necessárias 3 etapas:

- Circuito de regeneração: transforma o sinal recebido em uma palavra digital
- Decodificador: conversor Digital/Analógico
- Filtros de reconstrução:
  - filtro passa-baixas centrado na metade da frequência de amostragem
  - Interpolador

# PCM

Espectro da função de amostragem real  $H(f)$ :



Sinal senoidal amostrado no domínio do tempo com pulso retangular  $f_i = 20 \text{ MHz}$  Espectro correspondente

$$T = 1^{-9} \text{ s}$$

$$T_s = 1^{-8} \text{ s}$$

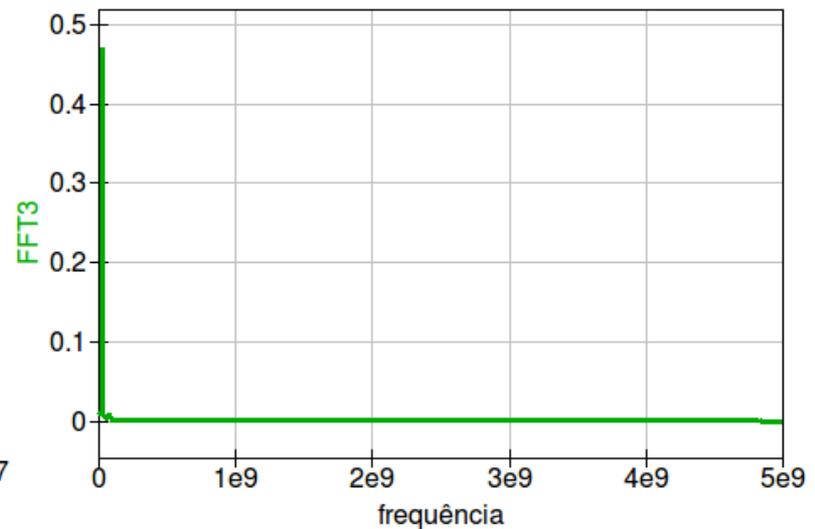
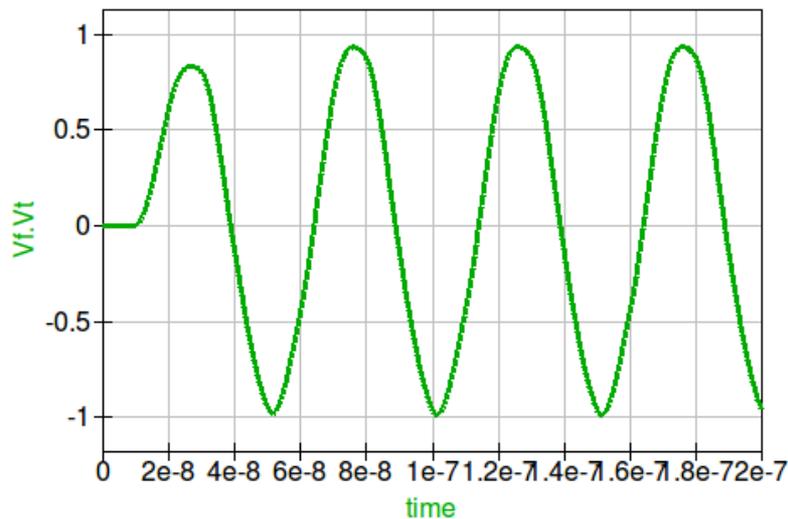


# PCM

## Filtros de reconstrução:

### ▮ filtro passa-baixas:

- ▮ Atenua as componentes de alta frequência presentes no sinal de saída do conversor D/A
- ▮ centrado na metade da frequência de amostragem
- ▮ Implementação simples a nível de circuito

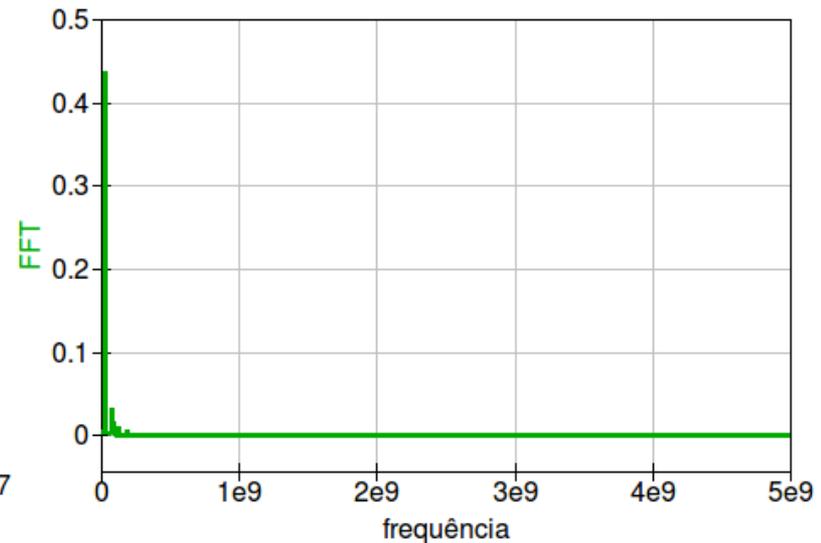
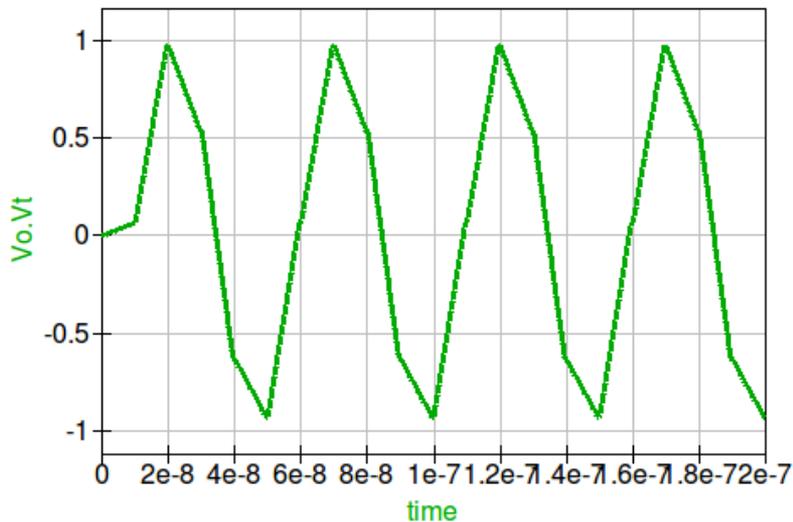


# PCM

Filtros de reconstrução:

□ Interpolador linear:

- Gera valores intermediários entre as amostras seguindo uma função linear
- Implementação possível a nível de circuito analógico ou processamento digital de sinais

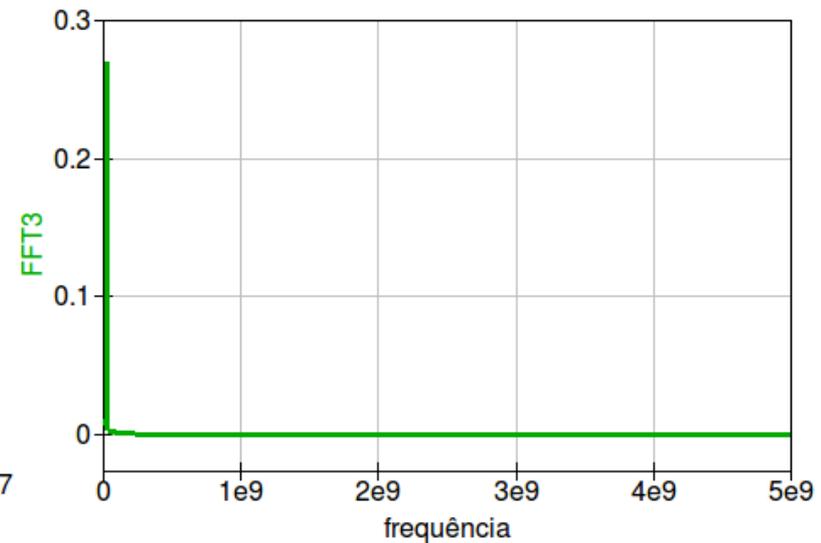
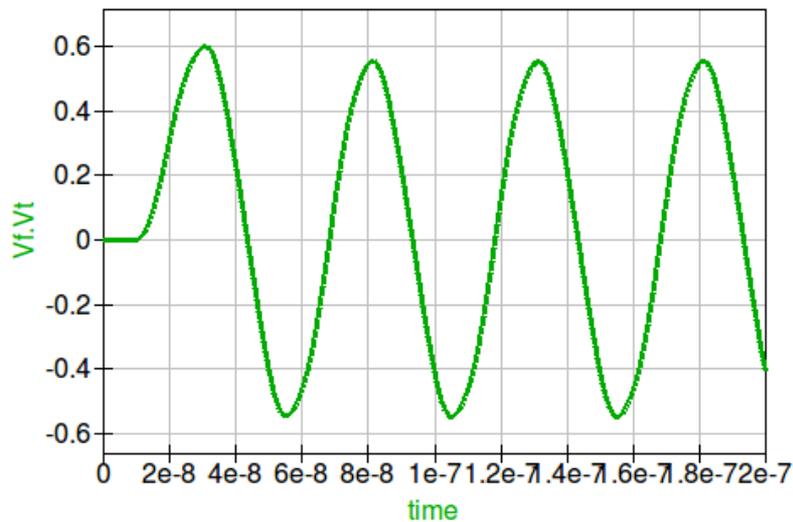


# PCM

Filtros de reconstrução:

□ Interpolador  $\sin(x)/x$ :

- Gera valores intermediários entre as amostras seguindo uma função sinc
- Implementação possível somente com processamento digital de sinais
- Alta complexidade

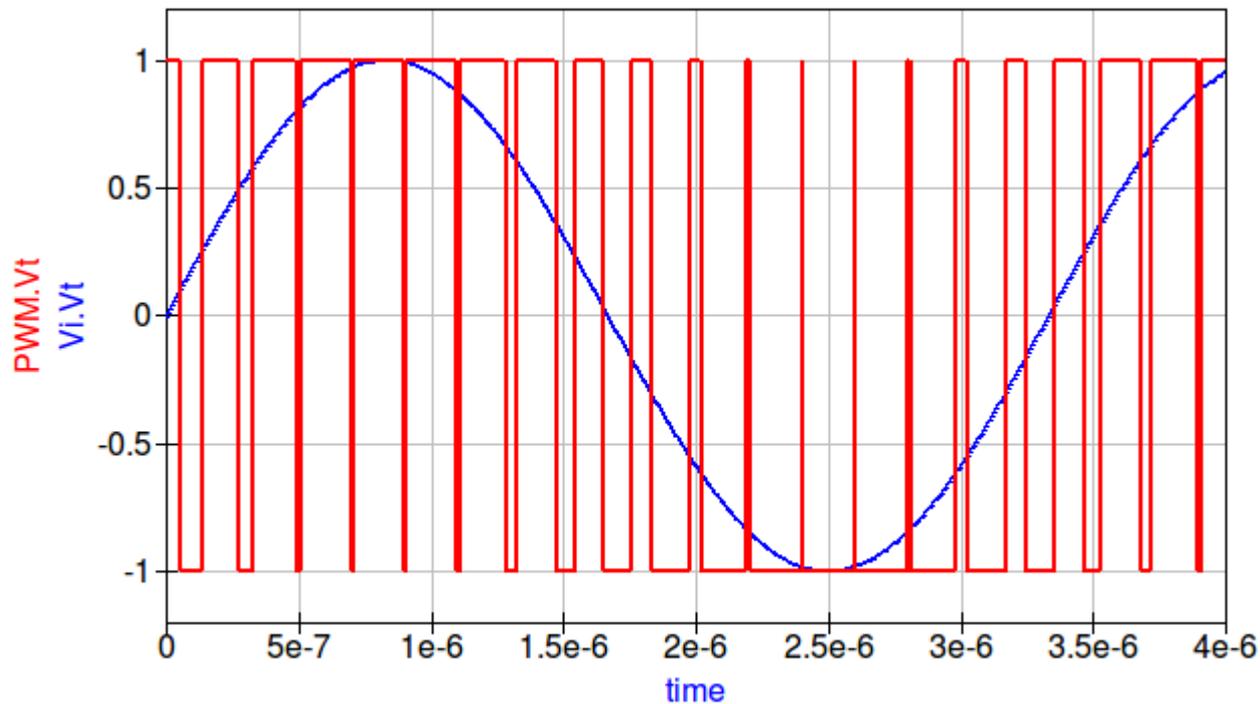


# Modulação por Pulsos

- Modulação por largura de pulso (PWM)
- Técnica de modulação onde a informação está contida na duração temporal (largura) do pulso
- Amplamente utilizada no controle de potência sobre cargas inerciais (lâmpadas, motores, aquecedores, etc)
- Operações básicas da modulação PWM:
  - Geração do sinal retangular
  - Ajuste da largura do pulso (analógico ou digital)
  - Integração temporal (valor médio)

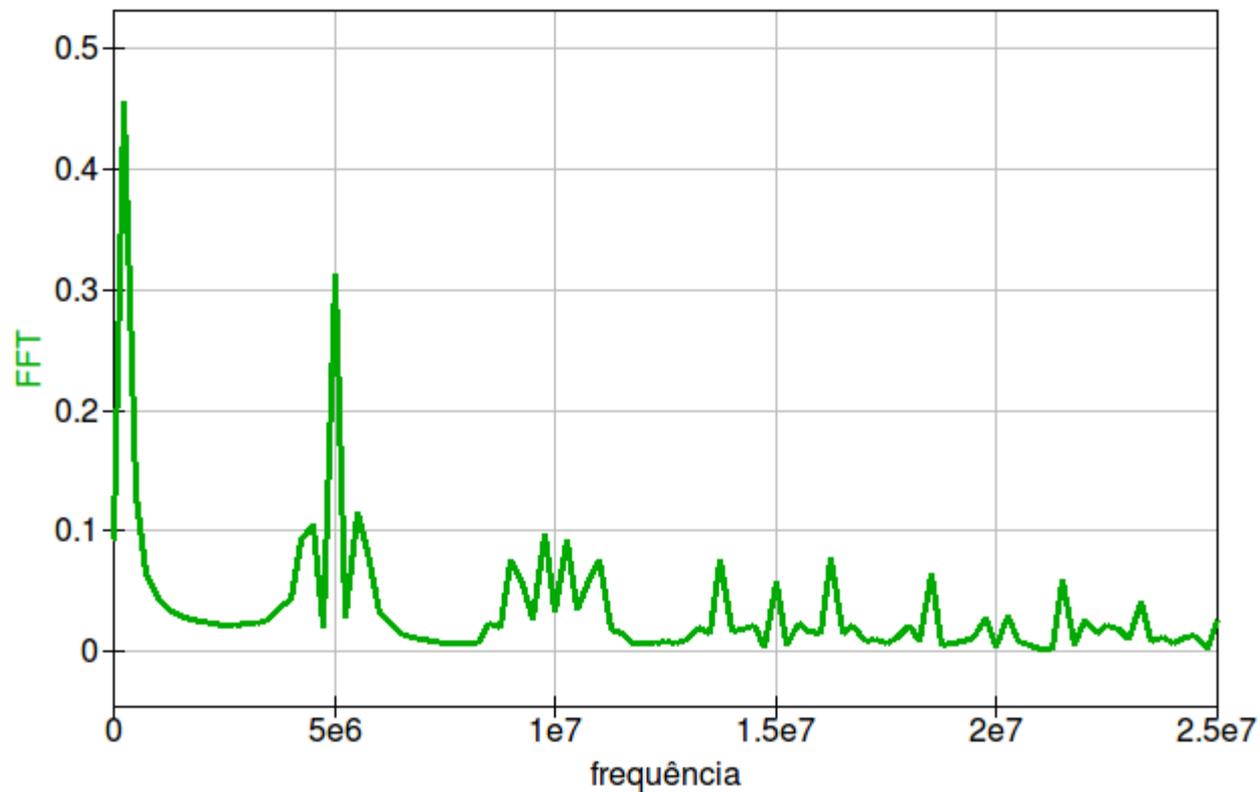
# PWM

## Modulador: característica temporal



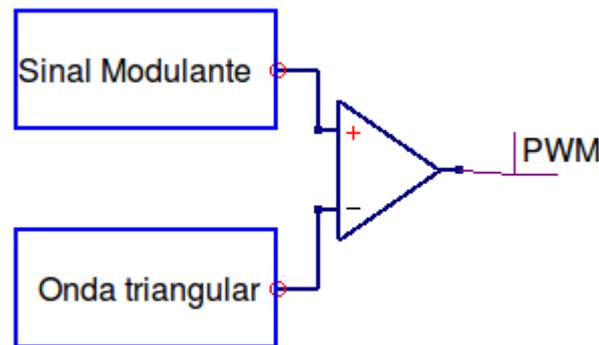
# PWM

## Modulador: espectro do sinal PWM



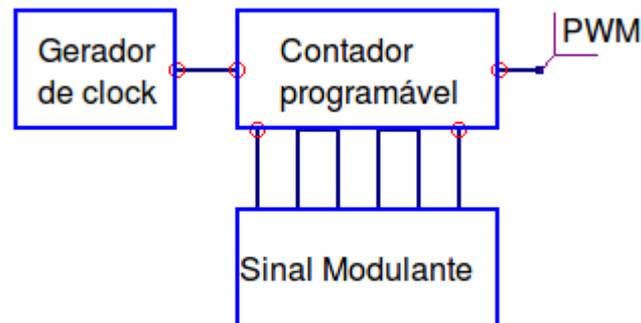
# PWM

- Diagrama em blocos do modulador:
- Analógico:
  - Sinal modulante é comparado com uma onda triangular ou “dente de serra”
  - Saída do comparador é um sinal retangular modulado em largura pelo sinal modulante



# PWM

- Diagrama em blocos do modulador:
- Digital:
  - Contador programável de  $n$  bits
  - Sinal modulante é uma palavra digital
  - Saída do contador é um sinal retangular modulado em largura pelo sinal modulante



# PWM

## □ Modulador Digital: características

- Resolução: está ligada ao número de bits do contador

$$R = \frac{1}{2^n}$$

- Frequência do sinal PWM:

$$f_{PWM} = \frac{f_{ck}}{2^n}$$

- Onde:

- n: número de bits do contador
- $f_{ck}$ : frequência de clock do contador

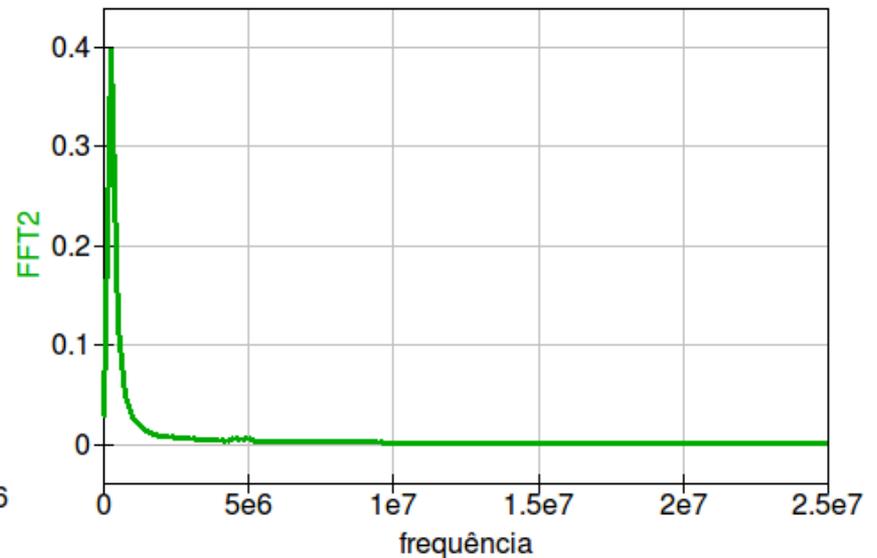
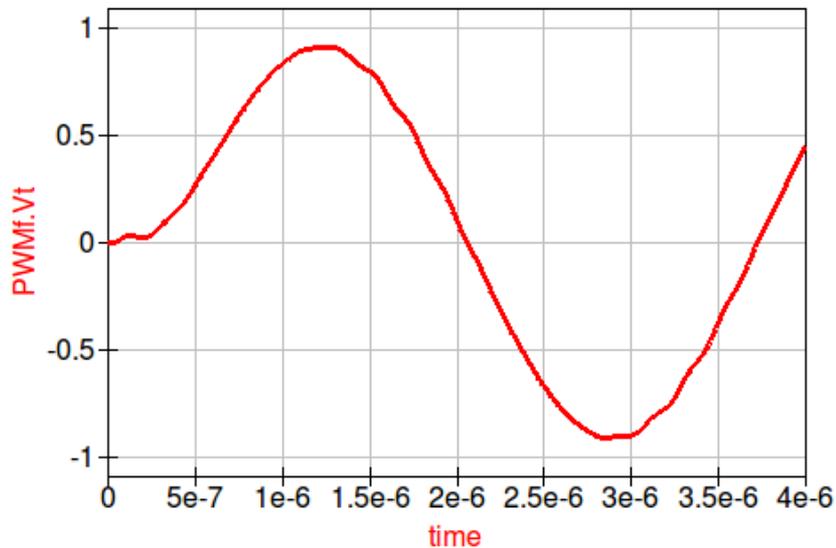
# PWM

- Demodulação: análise matemática
- A demodulação PWM é baseada na média temporal do sinal modulante utilizando um integrador:

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt.$$

# PWM

- Demodulação:
- Filtro passa-baixas com frequência de corte inferior a  $f_{\text{PWM}}$



# PWM

Exercício:

- a) Projete um modulador PWM digital de modo que a resolução seja de pelo menos 0,1 % e a frequência do sinal PWM de 100 kHz.
- b) Sabendo-se que o sinal modulante possui uma  $BW=10$  kHz, projete um filtro passa-baixas (demodulador) de modo que o ruído do sinal PWM seja atenuado de pelo menos um fator 100 dentro da banda de frequência do sinal (determine frequência de corte e número de polos)