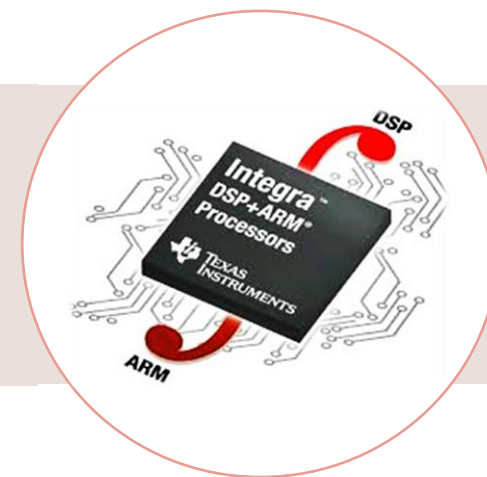


Projeto de Controle Digital

Projeto e Análise do conversor estático e do circuito de condicionamento de sinais

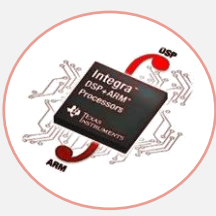


Prof. Emerson Giovani Carati, Dr. Eng.

Controle Digital

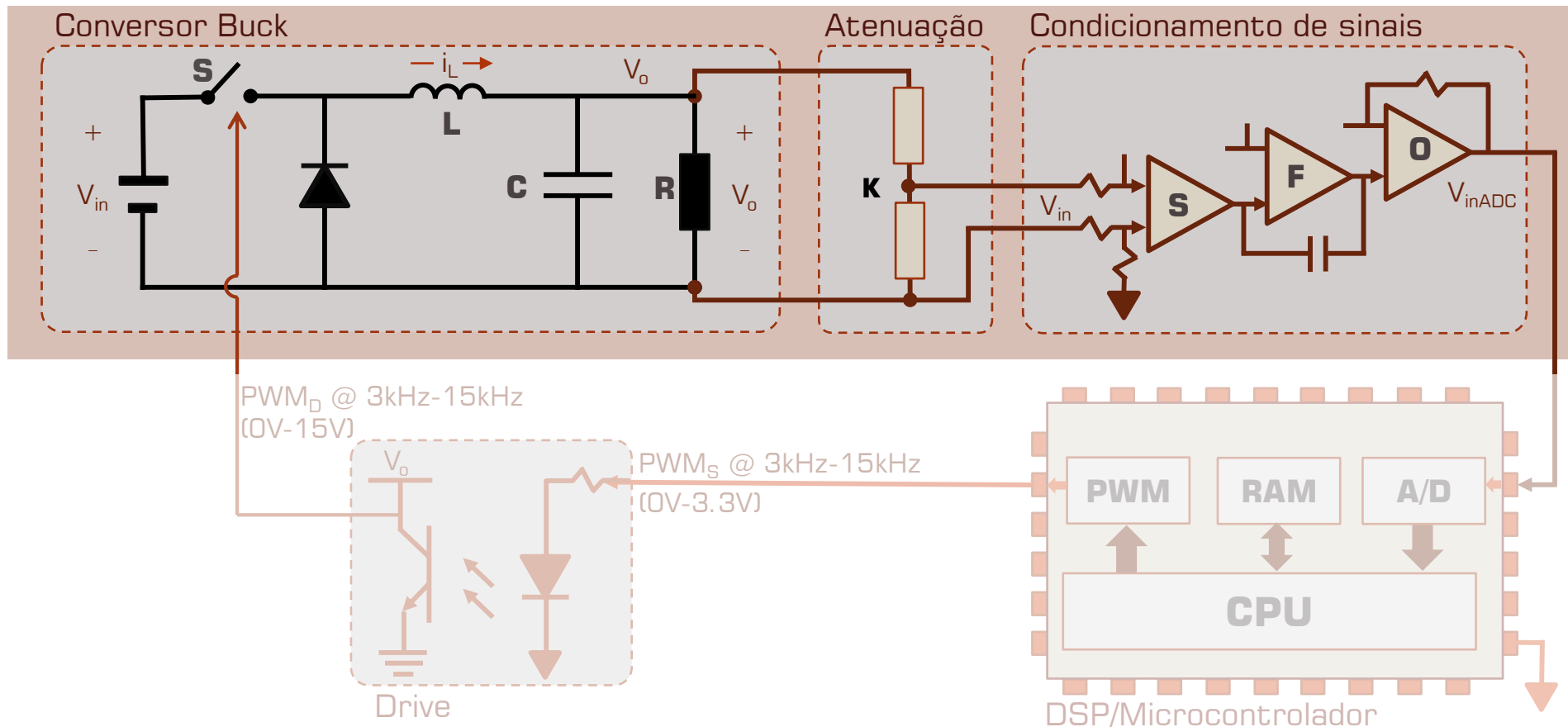
emerson@utfpr.edu.br

Projeto de controle digital



❖ Objetivo

- Realizar o projeto dos circuitos que compõem o conversor **estático** e o **sistema de condicionamento de sinais**

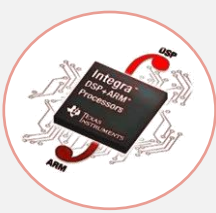


O bom funcionamento de projeto de engenharia está diretamente relacionado ao **método de acionamento** deste sistema e seu **sistema de controle**.

No caso do conversor Buck, o sistema de controle monitora a tensão de saída do conversor e, através de um sistema microprocessado (DSP, uC), gera sinais de comando (PWM) para o acionamento da chave (MOSFET) do conversor.

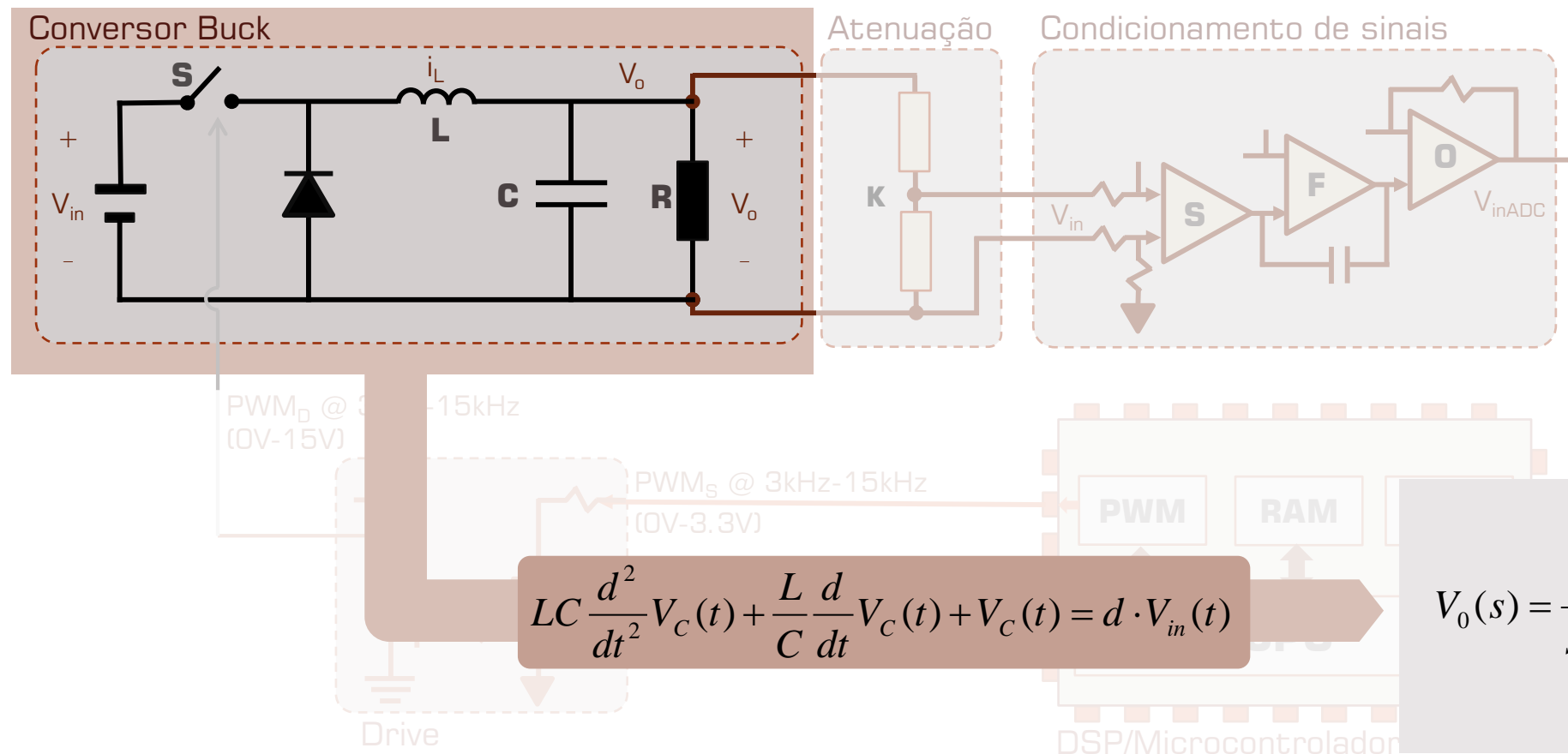
O monitoramento da tensão de saída exige **circuitos de atenuação** e de **condicionamento de sinais**. Embora estes circuitos possam ser projetados para serem os mais simples possível, os mesmos devem atender questões de qualidade, desempenho e segurança.

Projeto de controle digital



❖ Modelagem do conversor estático

- Objetivo: obter modelo em função de transferência do circuito que compõe o **conversor Buck**.

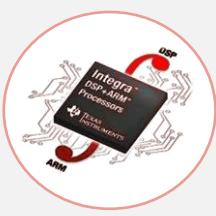


A operação do conversor Buck envolve o acionamento da chave S, geralmente com frequência de chaveamento fixa (f_s), com razão cíclica d , proporcional a relação de tensão V_o/V_{in} .

Apesar da tensão de saída ser proporcional a razão cíclica, a presença dos elementos L e C introduzem transitórios, que contribuem para filtragem das harmônicas do acionamento PWM. O **circuito resultante é do tipo RLC** com tensão de entrada E ou O. Assim, a tensão de saída pode ser dada pela **função de transferência**:

$$V_o(s) = \frac{1/LC}{s^2 + 1/RC s + 1/LC} \cdot d \cdot V_{in}(s)$$

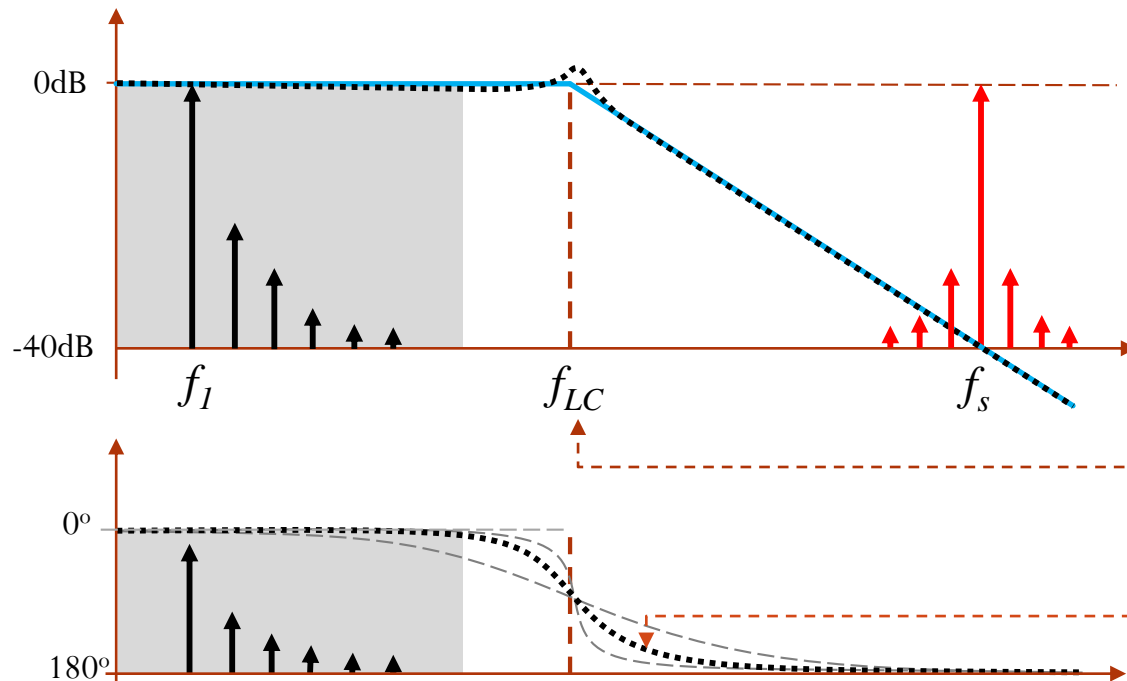
Projeto dos filtros LC e Sallen-key



❖ Conversor de potência: Filtro LC (2ª ordem) + Carga (R)

- Função de transferência do Filtro LC + Carga R $\Rightarrow R = \frac{V_0^2}{P_0}$

$$G_{LC}(s) = \frac{\omega_{LC}^2}{s^2 + 2\zeta_{LC}\omega_{LC}s + \omega_{LC}^2} \Rightarrow \omega_{LC} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi f_{LC}, \quad \zeta_{LC} = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$



$$f_1 = 10\text{Hz} - 100\text{Hz}$$

$$f_s = 3\text{KHz} - 15\text{KHz}$$

$$f_{LC} = \sqrt{f_1 f_s}$$

$$\zeta_{LC} \approx 0,4 \leftrightarrow 0,7$$

O projeto dos componentes do conversor Buck pode ser realizado por diversas metodologias diferentes, tanto do ponto de vista de eletrônica de potência quanto de controle.

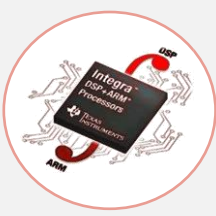
O método da **banda passante** considera que o filtro LC do conversor deve ser capaz de **atenuar** significativamente as **harmônicas** do acionamento PWM ao mesmo tempo que permite **controlar adequadamente** o sinal de tensão.

Assim, definida a **frequência de chaveamento** (f_s) e a **frequência fundamental da saída** (f_1), pode-se centralizar geometricamente a **frequência de corte do filtro** ($f_{LC} = \sqrt{f_1 f_s}$).

O valor do **amortecimento** (ζ_{LC}) do filtro LC pode ser definido de forma a obter fase adequada na faixa de frequência de interesse ($f_1 - n \cdot f_1$). Valores menores ($\zeta_{LC} < 0,7$) permitem ter transição de fase mais rápida na frequência de corte e **reduzir a fase da saída em baixas frequências**.

A partir dos valores de ζ_{LC} e f_{LC} pode-se determinar L e C do conversor de potência.

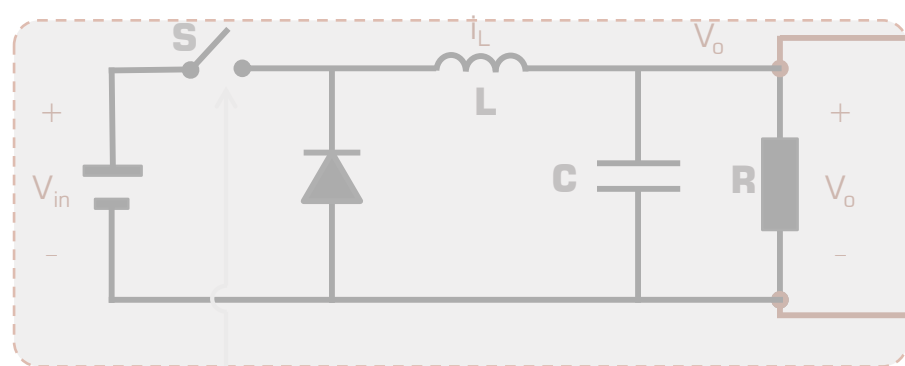
Projeto de controle digital



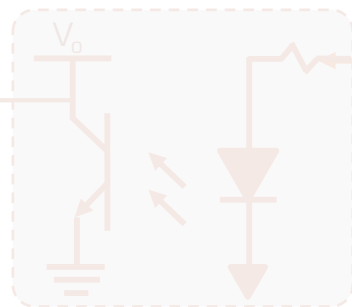
❖ Modelagem do sistema de condicionamento de sinais

- Objetivo: obter modelo **em função de transferência do circuito de medição** da tensão de saída.

Conversor Buck

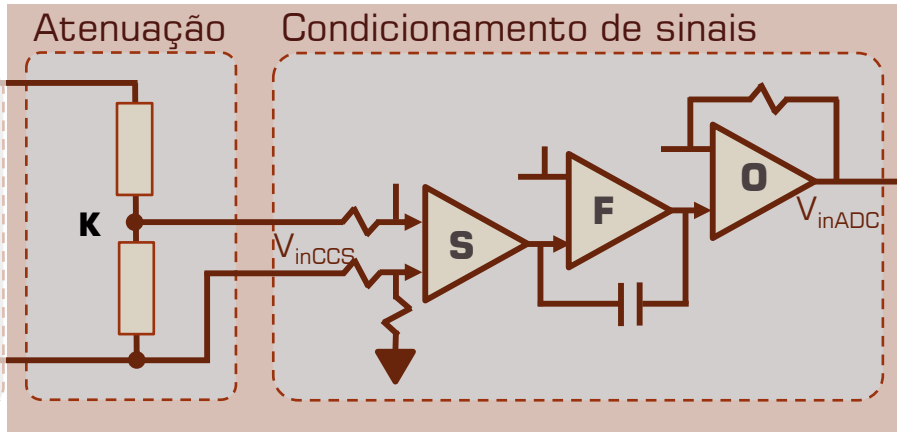


PWM_D @ 3kHz-15kHz
(0V-15V)



Drive

PWM_S @ 3kHz
(0V-3.3V)



O circuito de **subtração** é utilizado para calcular a diferença de potencial entre os pontos de medição de V_{inCCS} . Desta forma, se evita problemas de ruído de modo comum ou referencial alterado entre as alimentações do circuito de potência e de sinais.

O circuito de **filtragem** é utilizado para selecionar a banda passante do sinal medido pelo DSP, de forma que frequências fora da faixa de interesse (harmônicas do PWM, EMI, ruídos, ...) sejam minimizadas.

O circuito de **offset** é utilizado para ajustar o sinal de saída do sistema condicionamento de sinais (V_{inADC}) a faixa de medição do conversor A/D, garantindo tanto a integridade deste na presença de sobretensões como também a possibilidade de medir tensões fora da faixas nominal de operação.

Embora a tensão de saída V_o do conversor Buck seja geralmente menor que sua entrada V_{in} , os níveis de tensão ainda não são compatíveis com o conversor A/D do DSP/uC.

O circuito de medição geralmente é composto por subcircuitos de **atenuação** (K), **subtração** (S), **filtragem** (F) e **offset** (O).

O circuito de **atenuação** é utilizado para reduzir o sinal de medição de V_o (0V-30V) para V_{inCCS} (0V-3V), compatível com os AOs.

Projeto do Circuito de Condicionamento de Sinais



❖ Objetivo:

Projetar e analisar o **sistema de condicionamento de sinais**, incluindo:

- **Transdutor (divisor resistivo** para ajuste de amplitude)

1. Tensão de entrada: 0 – 30V
2. Sinal de saída: 0 – 3V

- **Medição diferencial (circuito subtrator** para medição de diferença de potencial)

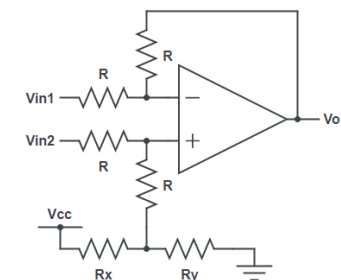
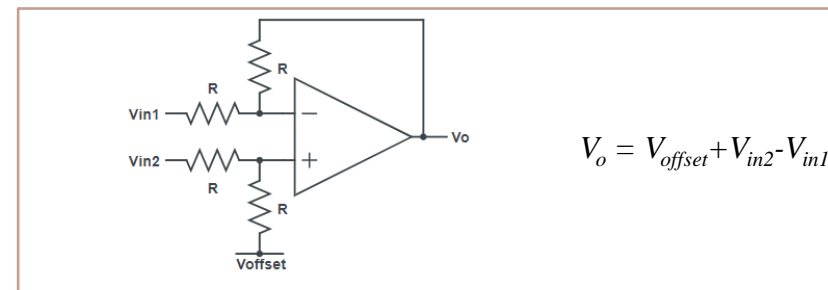
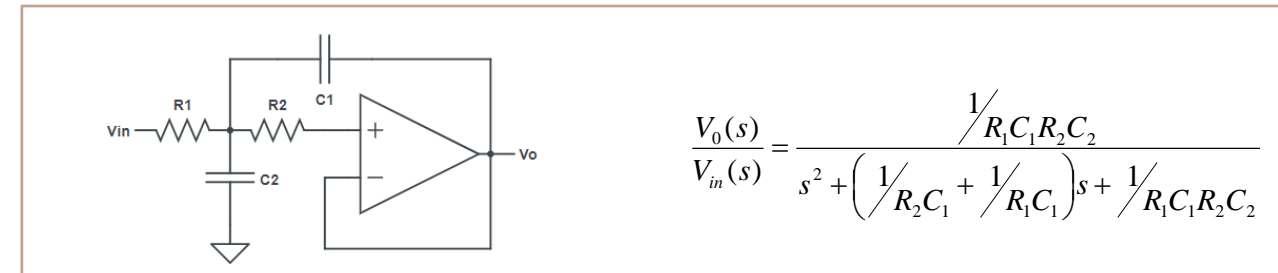
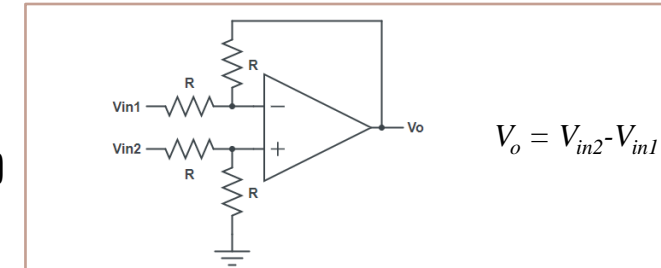
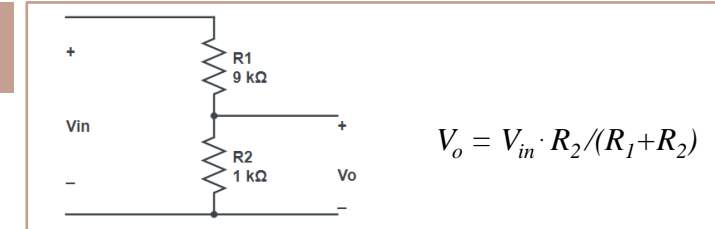
1. Ganho sinal 1: 0dB
2. Ganho sinal 2: 0dB
3. Impedância de entrada mínima = 10kΩ

- **Filtro passa-baixas** (filtro **Sallen-Key** 2ª ordem)

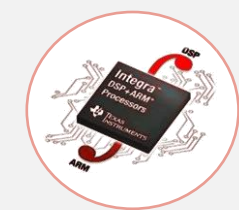
1. Filtro passa-baixas de 2ª ordem $f_c \approx 1\text{kHz}$, $Q > 0.7$
2. Referência - <http://sim.okawa-denshi.jp/en/OPseikiLowkeisan.htm>

- **Ajuste de offset** (ajuste do meio da escala do ADC)

1. Sinal de entrada: 0 – 3V
2. Sinal de saída: 1V – 2V
3. Offset: 1V
4. Ganho: 0,33 (3:1)



Projeto dos filtros LC e Sallen-key

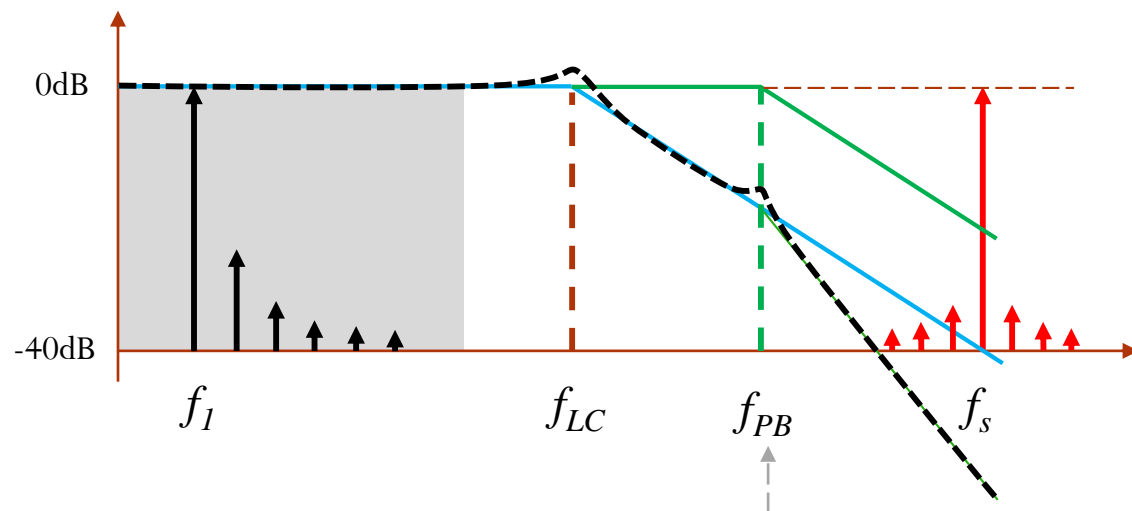


❖ Condicionamento de sinais: Filtro Passa Baixas 2ª ordem (Sallen-key)

- Função de transferência do Filtro Passa Baixas 2ª ordem $R1, R2, C1, C2 = f_i(\omega_{PB}, \zeta_{PB})$

$$G_{PB}(s) = \frac{\omega_{PB}^2}{s^2 + 2\zeta_{PB}\omega_{PB}s + \omega_{PB}^2}$$

$$\omega_{PB} = 2\pi f_{PB} = ? \quad \zeta_{PB} = ?$$



A posição da **frequência de corte do Filtro Sallen-Key** (f_{PB}) deve ser tal que contribua ao máximo na atenuação de harmônicas do PWM e evite a sobreposição dos picos de ambos os filtros LC e PB. Desta forma pode-se adotar um valor (α) inferior a média geométrica de f_s e f_{LC} .

$$f_s = 3KHz - 15KHz$$

$$f_{LC} = \sqrt{f_1 f_s}$$

$$f_{PB} = \alpha \sqrt{f_s f_{LC}}$$

$$0.5 < \alpha < 1$$

$$\zeta_{PB} \approx 0,1 \leftrightarrow 0,4$$

O projeto dos componentes do sistema de condicionamento de sinais é relativamente simples para os circuitos de atenuação ($K=R_2/(R_1+R_2)$), de subtração ($G=R_1/R_2$) e de offset ($V_{offset}=V_{cc}\cdot R_y/(R_x+R_y)$).

Para o projeto do circuito de filtragem pode-se considerar a banda passante e as frequências de chaveamento e do filtro LC do conversor.

A **frequência de corte do Filtro Sallen-Key** (f_{PB}) pode ser calculada como uma proporção (α) da média geométrica da **frequência de chaveamento** (f_s) e da **frequência de corte do filtro LC**:
- Ex: $f_{PB} = \alpha \sqrt{f_s f_{LC}}$

O **amortecimento** (ζ_{PB}) do filtro PB é também definido para minimizar a fase na faixa de frequência de interesse. Neste caso, como $f_{PB} > f_{LC}$, valores ainda menores de ζ_{PB} (0,1 – 0,4) podem ser utilizados para garantir menor influência na fase em malha fechada.

A partir dos valores de ζ_{PB} e f_{PB} pode-se determinar $R1, R2, C1, C2$ do filtro Sallen-Key.



Atividades: Projeto e análise em malha aberta

✓ Projete o **conversor Buck** de acordo com uma metodologia de sua escolha e verifique (utilizando simulações computacionais) se atende aos seguintes critérios:

- Banda passante
- Condução contínua
- Ripple de corrente $< 50\%$
- Ripple de tensão $< 2\%$

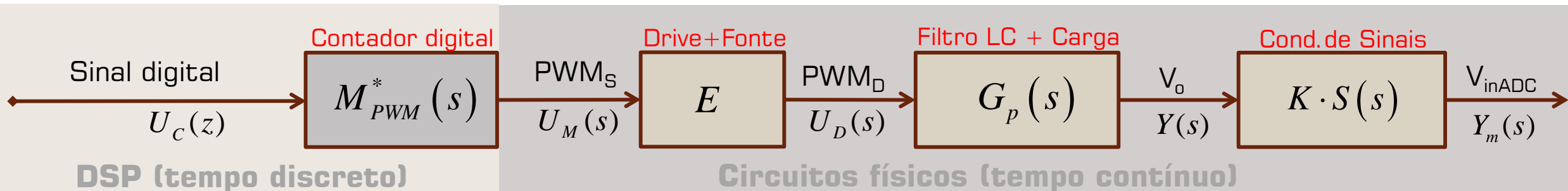
✓ Projete o **sistema de condicionamento de sinais** e verifique (utilizando simulações computacionais) o comportamento de cada um dos circuitos:

- Circuito de atenuação
- Circuito de subtração
- Circuito de filtragem
- Circuito de offset

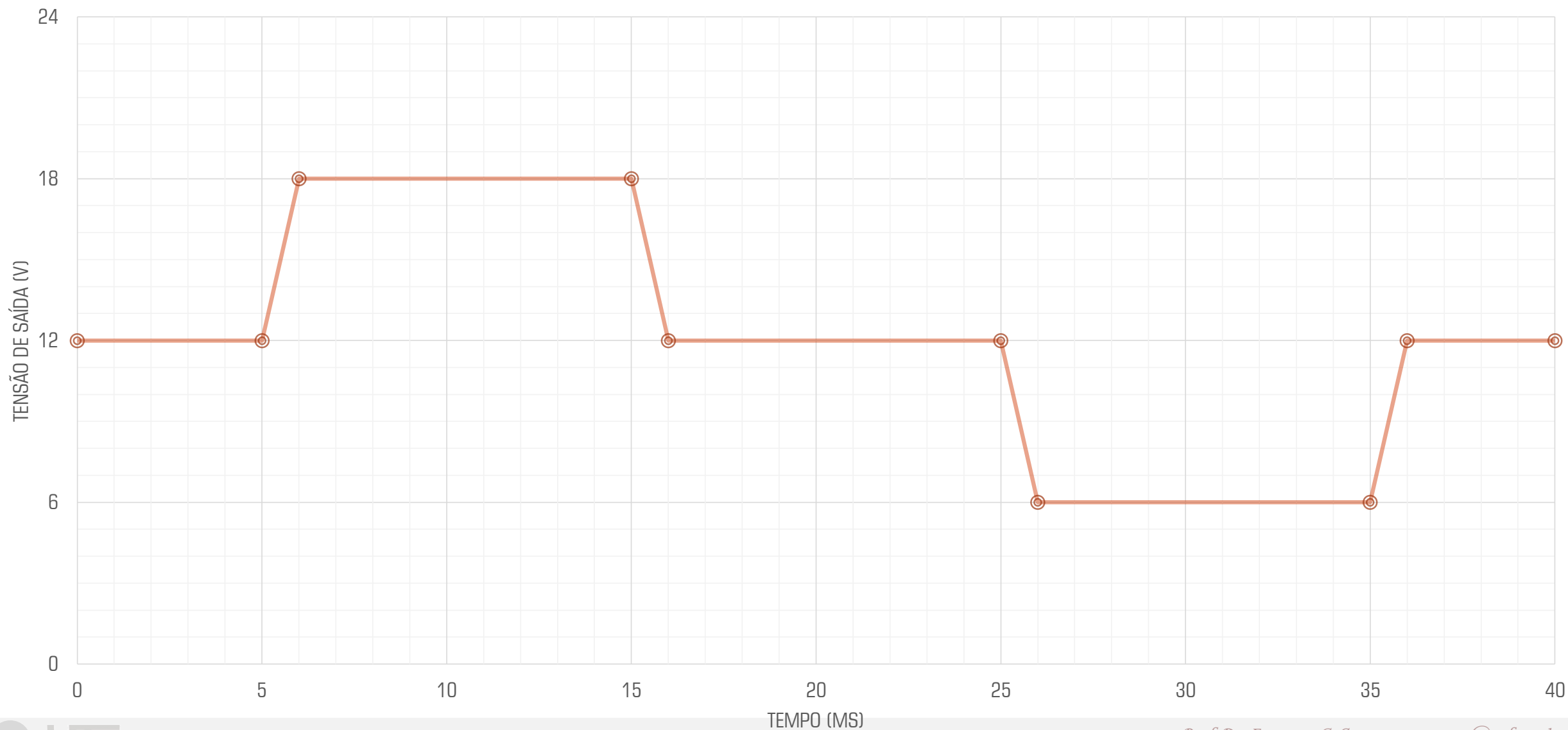
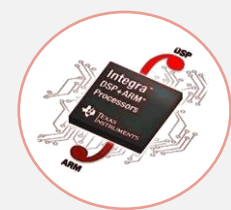
✓ Analise os respectivos sistemas (conversor Buck e sistema de condicionamento de sinais) verificando características como :

- tempo de subida e acomodação (respostas ao degrau)
- ganho e fase em função da frequência (diagramas de Bode)
- tensões de entrada e saída, atenuação de harmônicas e ruído de medida
- resposta a sinais variantes no tempo (onda senoidal, quadrada, trapezoidal, triangular, ...) conforme a definição de seu grupo.

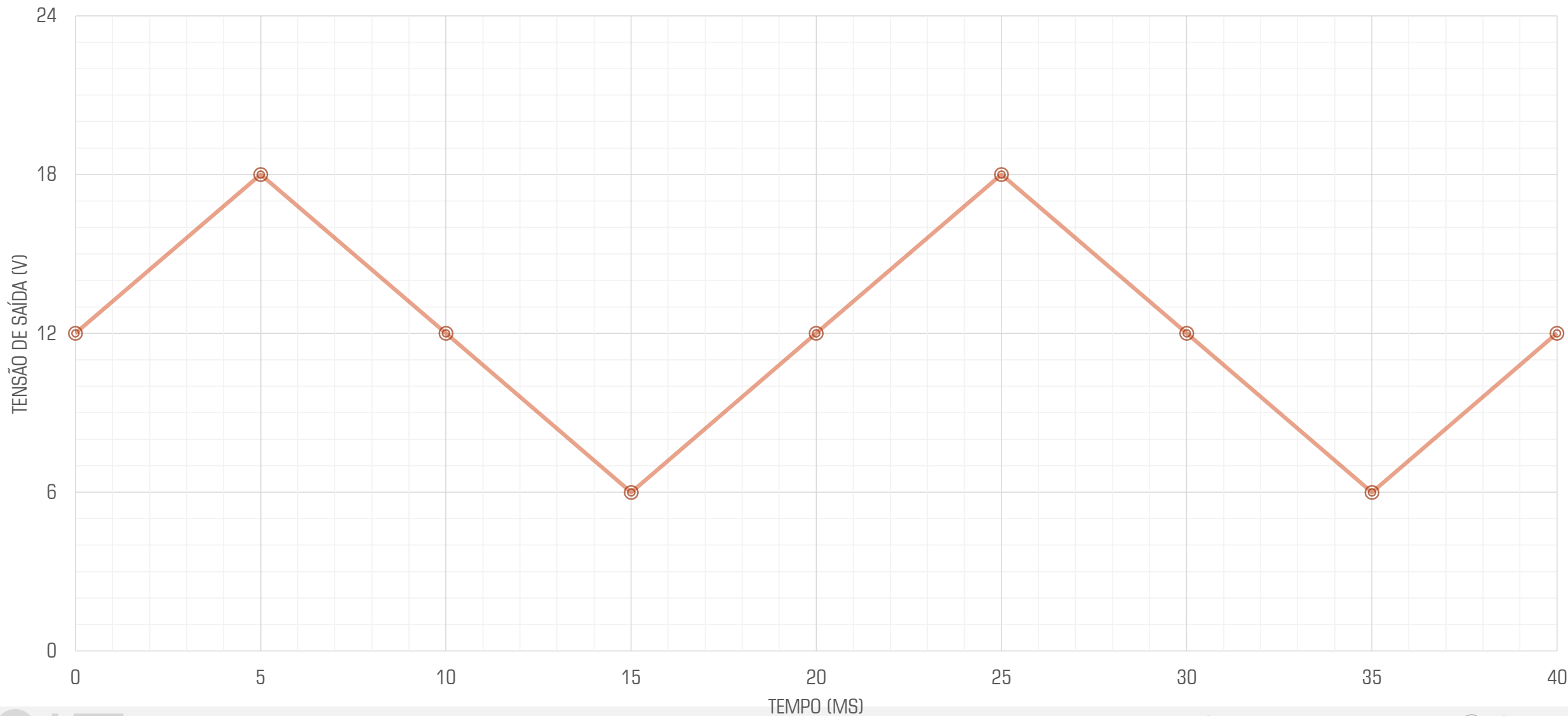
Para projeto e análise dos sistemas envolvidos no projeto, considere a definição de frequências dos sinais/grupo das telas que seguem.



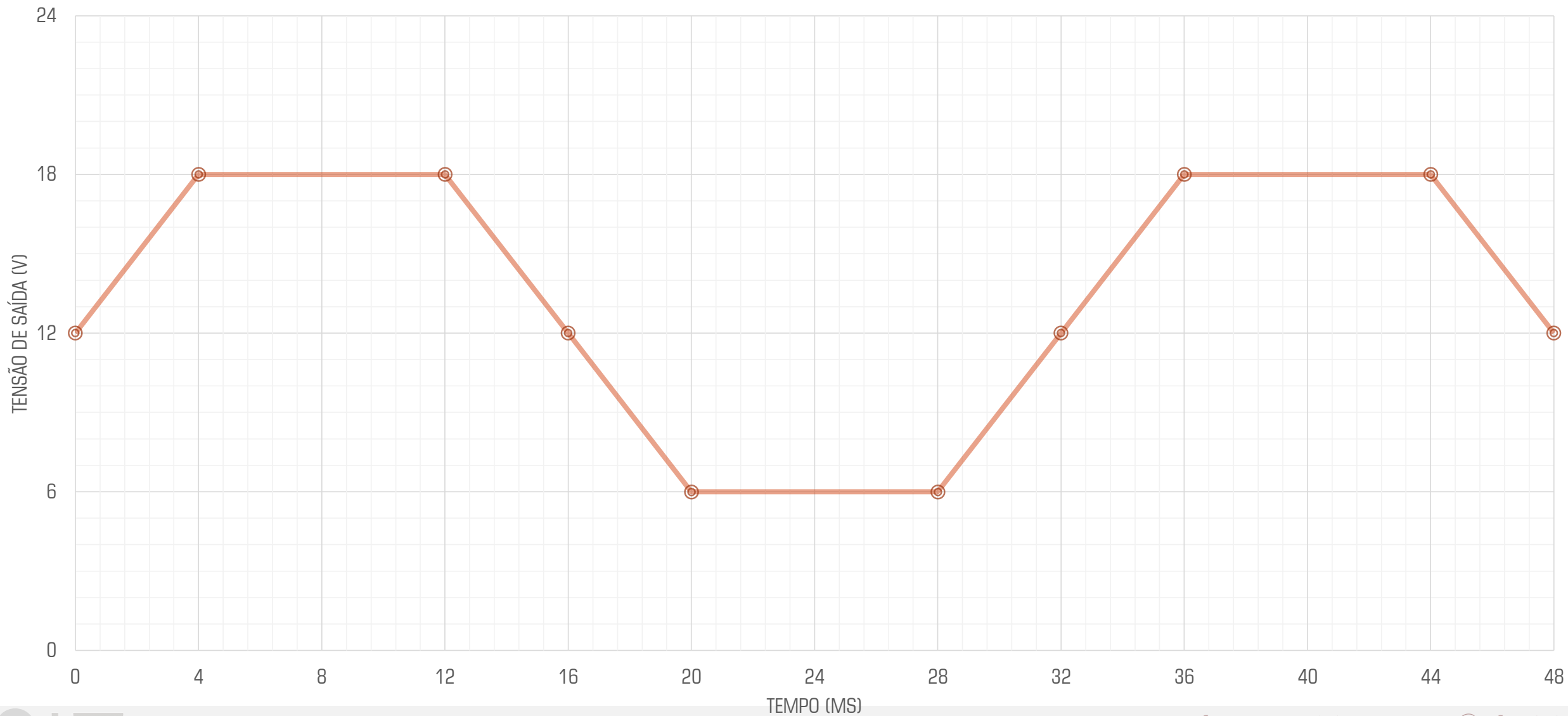
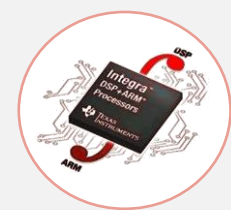
Sinal 1: $f_s = 10000 \text{ Hz}$



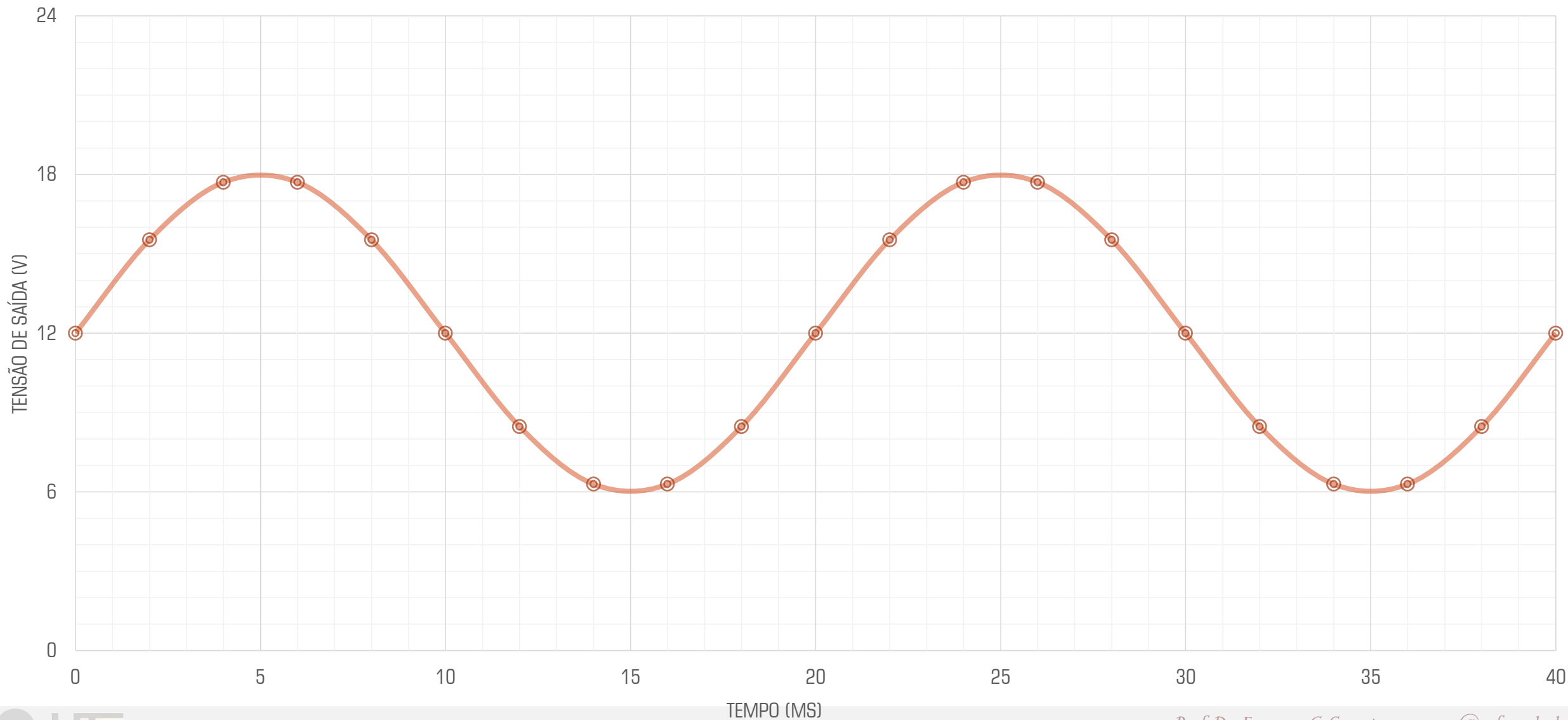
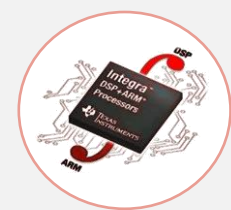
Sinal 2: $f_s = 10000 \text{ Hz}$



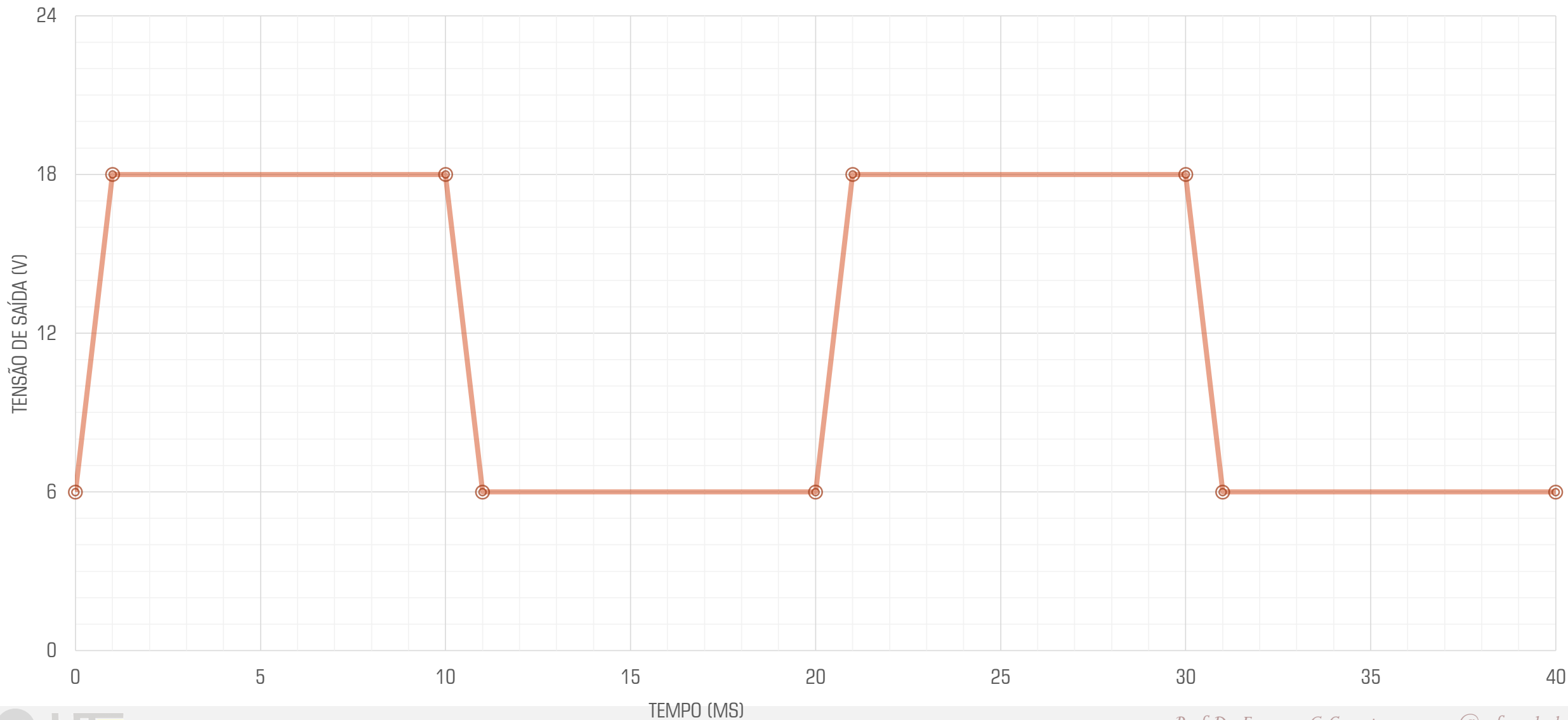
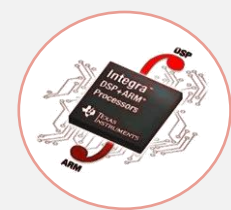
Sinal 3: $f_s = 6250 \text{ Hz}$



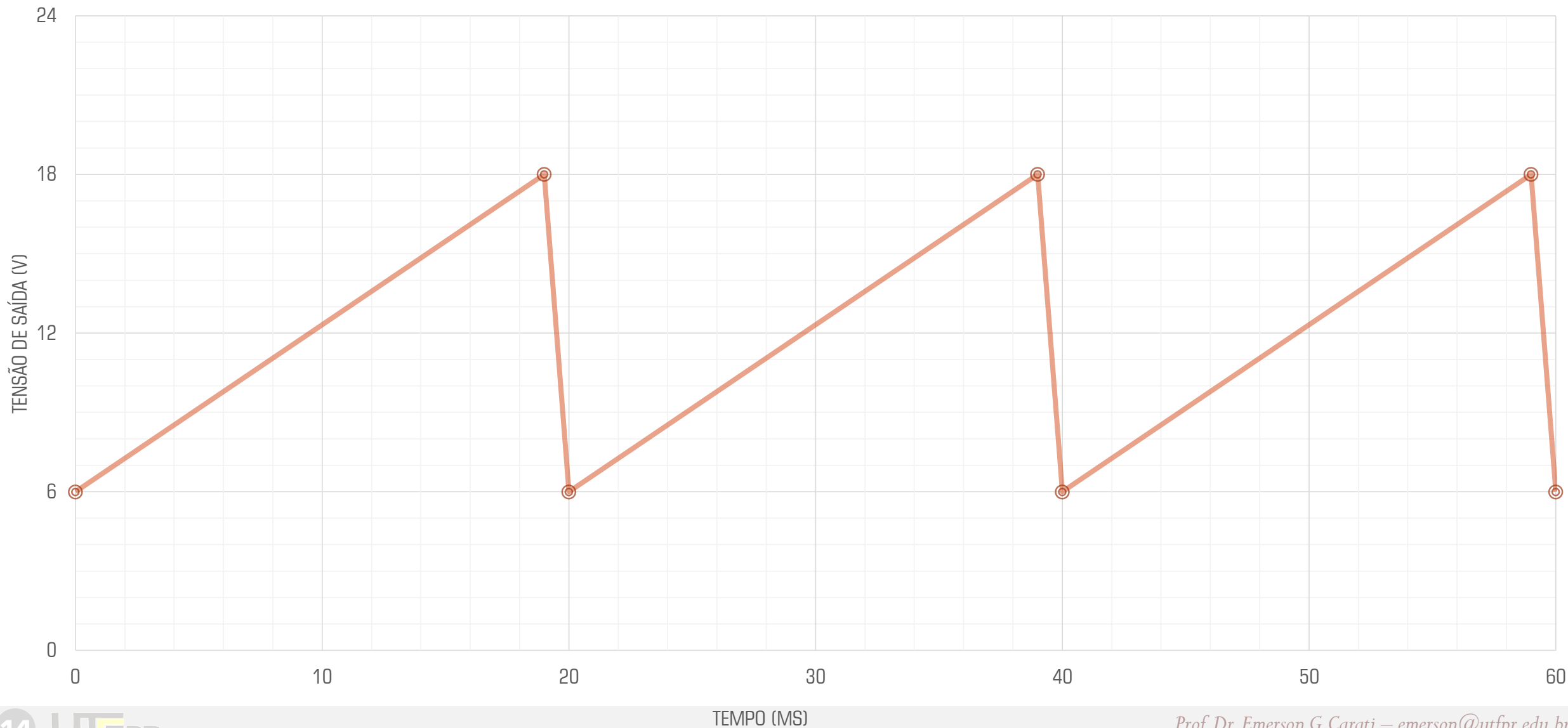
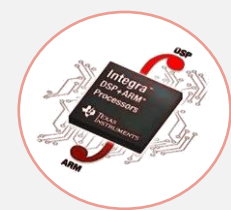
Sinal 4: $f_s = 5000 \text{ Hz}$



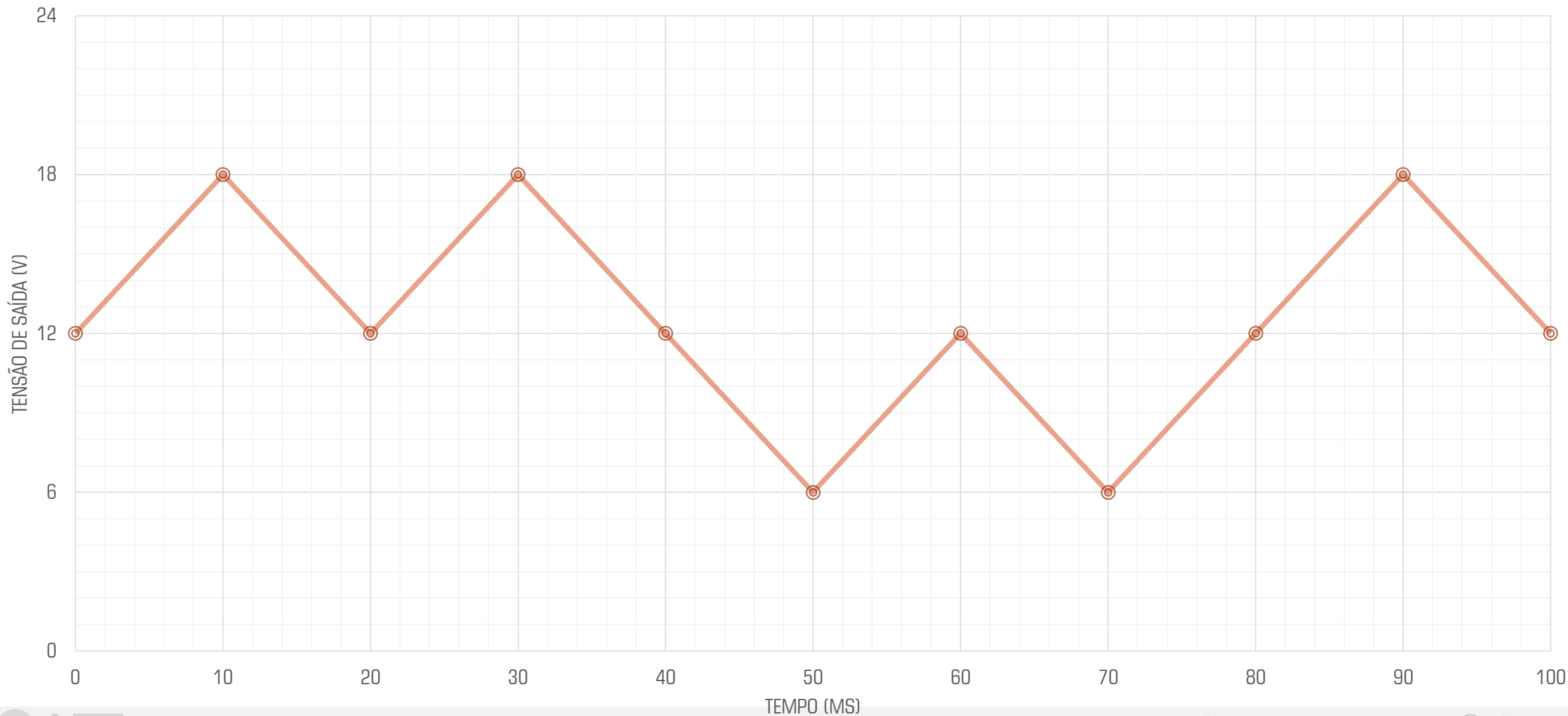
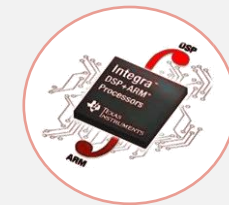
Sinal 5: $f_s = 15000 \text{ Hz}$



Sinal 6: $f_s = 7500 \text{ Hz}$



Sinal 7: $f_s = 12500 \text{ Hz}$



Sinal 8: $f_s = 10000 \text{ Hz}$

