

# PROJETO FINAL LABORATÓRIO DE COMUNICAÇÕES

MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO (PWM)

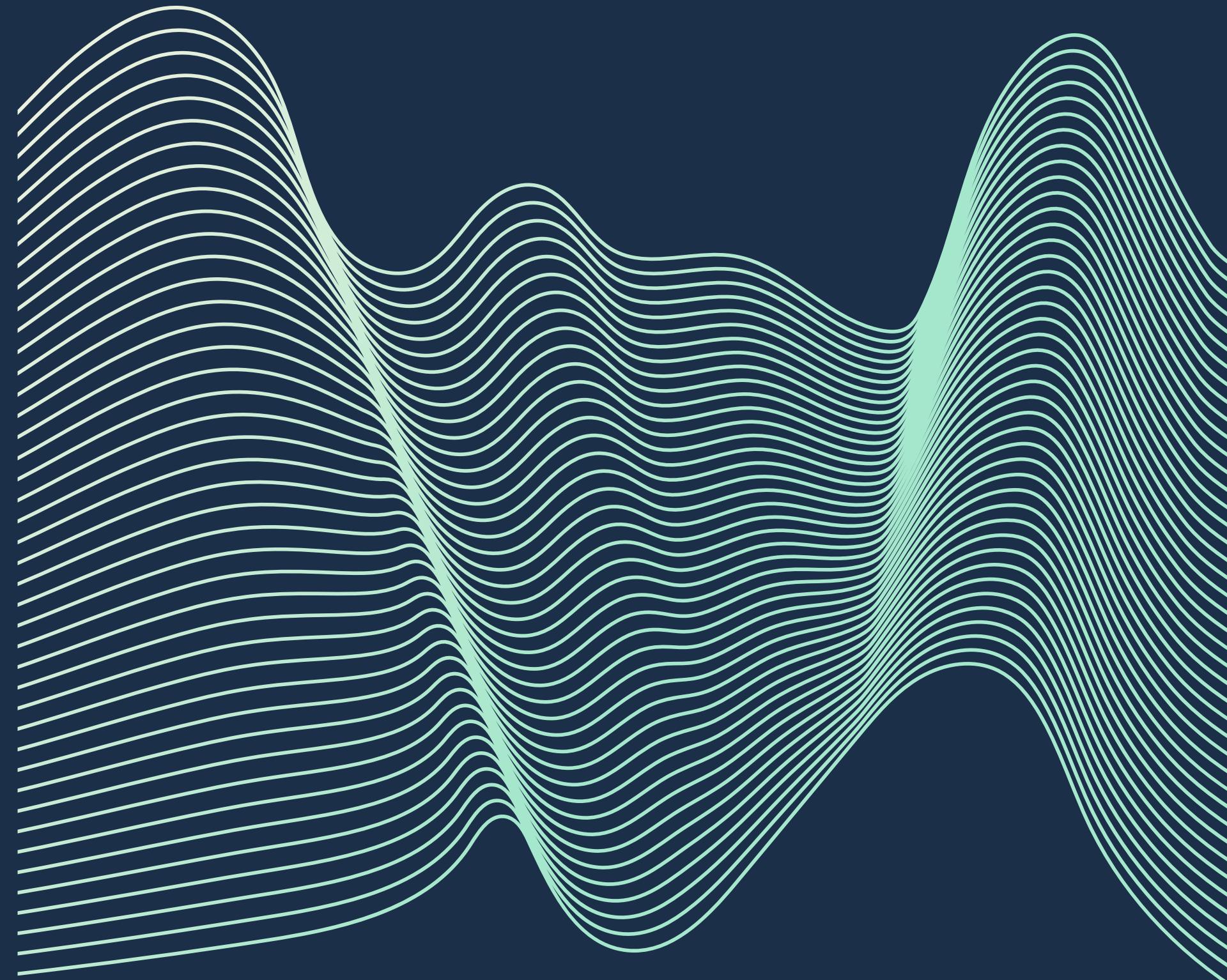
Bernardo Taulois  
Braga  
2019027369

Camila Santana  
Braz  
2019027423

Alexandre Augusto  
Leal Martins  
2019027253

# Agenda

- 03 Escopo do projeto
- 04 - PWM
- 07
- 08 - Explicação do circuito
- 14
- 15 Montagem
- 16 - Resultados
- 23
- 24 Referências

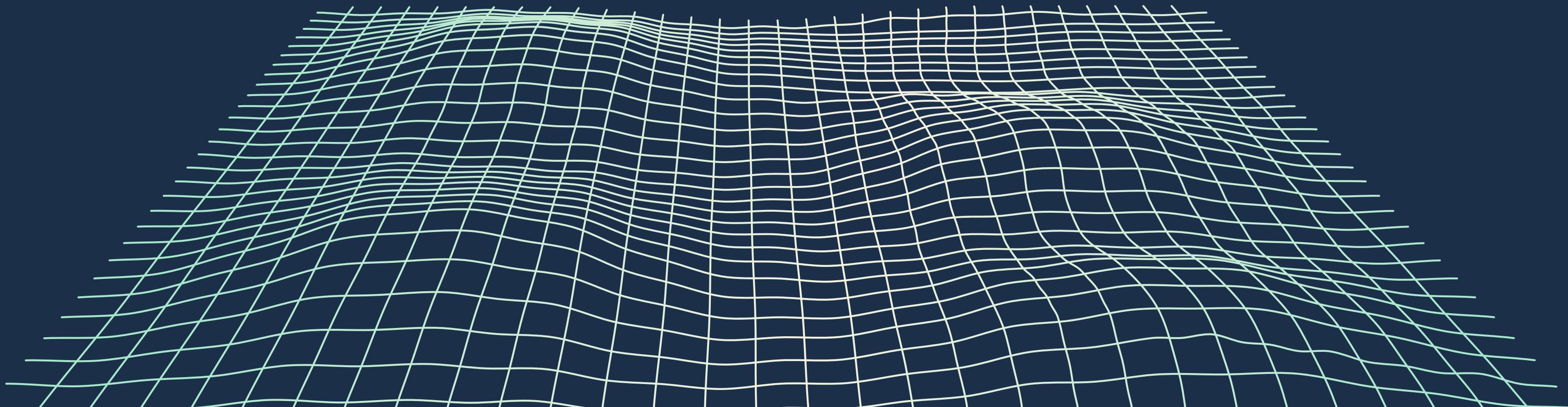


# ESCOPO

Círcito com transmissor, receptor e canal

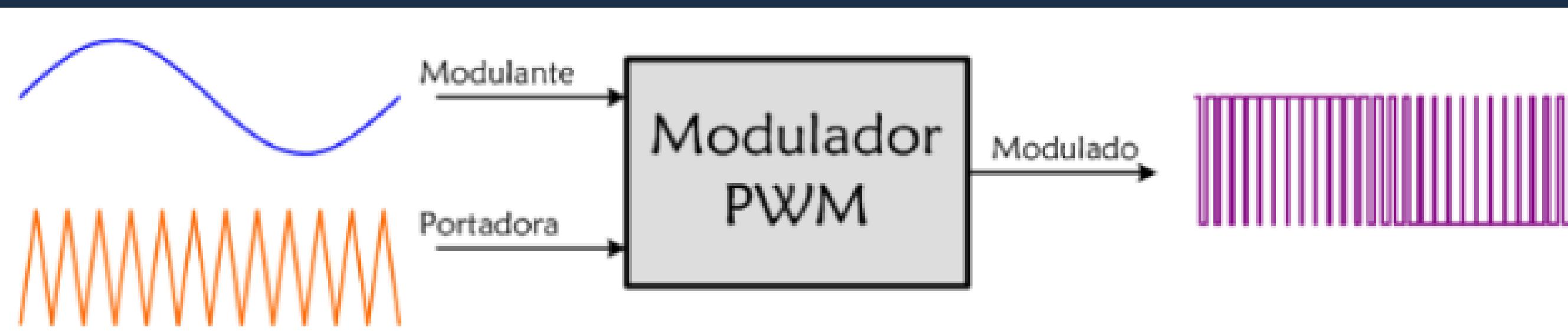
Modulação escolhida: MODULAÇÃO POR  
LARGURA DE PULSO

Uso de sinais reais



# PWM

A modulação por largura de pulso (PWM) é uma técnica amplamente utilizada na eletrônica para controlar a potência média entregue a um dispositivo. Essa técnica envolve a geração de um sinal com uma largura de pulso variável, permitindo o controle eficiente e preciso da intensidade dessa entrega sem a necessidade de alterar sua tensão de alimentação.



# Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento do circuito PWM baseia-se na variação da largura do pulso do sinal gerado.



Série de pulsos com uma amplitude fixa e uma duração ajustável. A largura do pulso representa a fração de tempo em que o sinal está em nível alto em relação ao período total do sinal.

A relação entre a largura do pulso e a tensão média do sinal é crucial para o controle da potência entregue ao dispositivo. Quando a largura do pulso é aumentada, a tensão média aumenta, resultando em uma maior potência média fornecida. Da mesma forma, uma redução na largura do pulso resulta em uma menor tensão média e, portanto, menor potência média.

# Vantagens e desvantagens

## Vantagens

- Resistência a ruído
- Compatibilidade com uma ampla gama de dispositivos
- Baixo custo de implementação

## Desvantagens

- Perdas de chaveamento em altas frequências
- Necessidade de filtragem adequada
- Complexidade do projeto

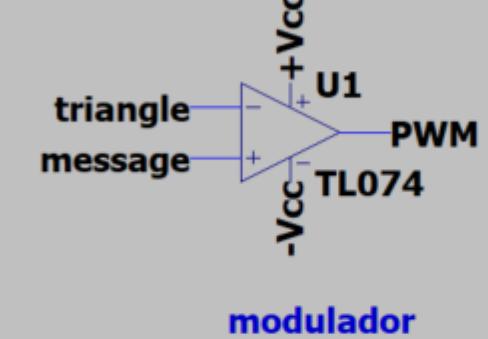
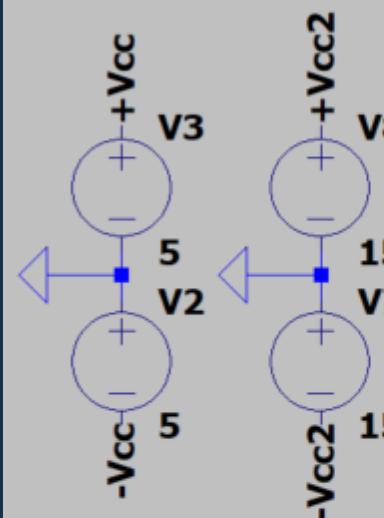
# Aplicações

- Controle de motores
- Fontes de alimentação chaveadas
- Controle de brilho em LEDs
- Controle de servo motores
- Sistemas de áudio digital



# EXPLICAÇÃO DO CIRCUITO

```
.include G:\Meu Drive\UFMG\2023_1 - Nono Período\Laboratório de Comunicações\Trabalho Final\modifica\TL074.301
.ic V(PWM)=0V
.ic V(int)=0V
.model MYSW SW(Ron=1 Roff=1Meg Vt=1.45 Vh=0)
.tran 0 2000u 500u
```



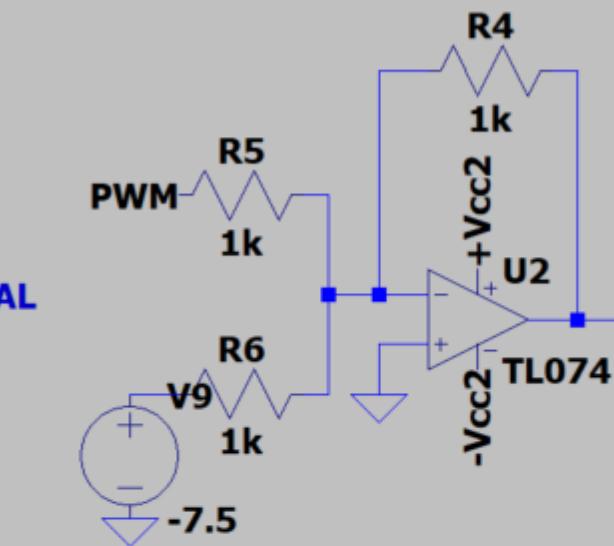
**portadora**

V4  
triangle  
PULSE(-1.5 1.5 0 10u 10u 0 20u)

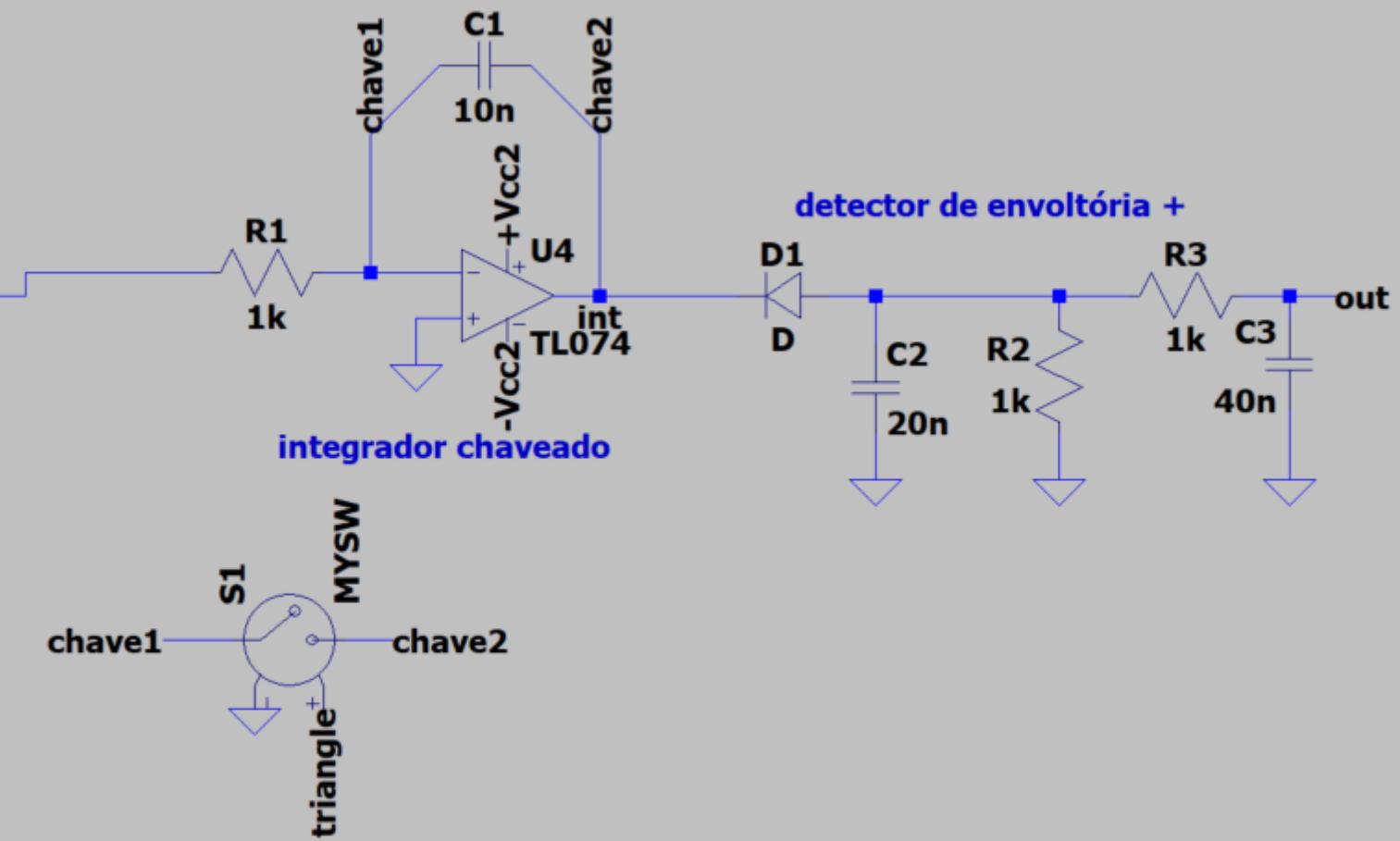
**mensagem quadrada**  
V6  
PULSE(-1.35 1.35 0 1n 1n 100u 200u)

**mensagem triangular**  
V5  
PULSE(-1.35 1.35 0 100u 100u 0 200u)

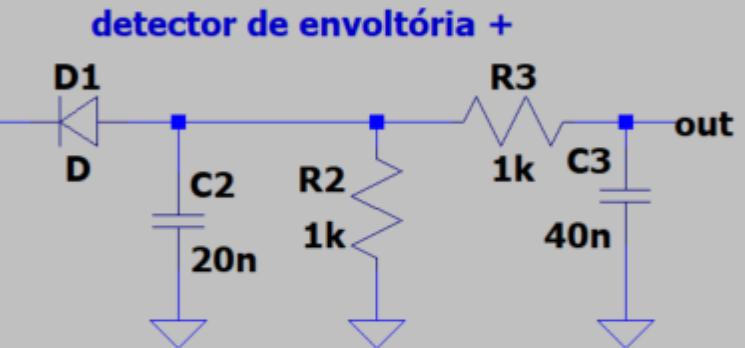
**message**  
V1  
mensagem senoidal  
SINE(0 1.35 5k 0 0 0)



**amplificador somador offset**

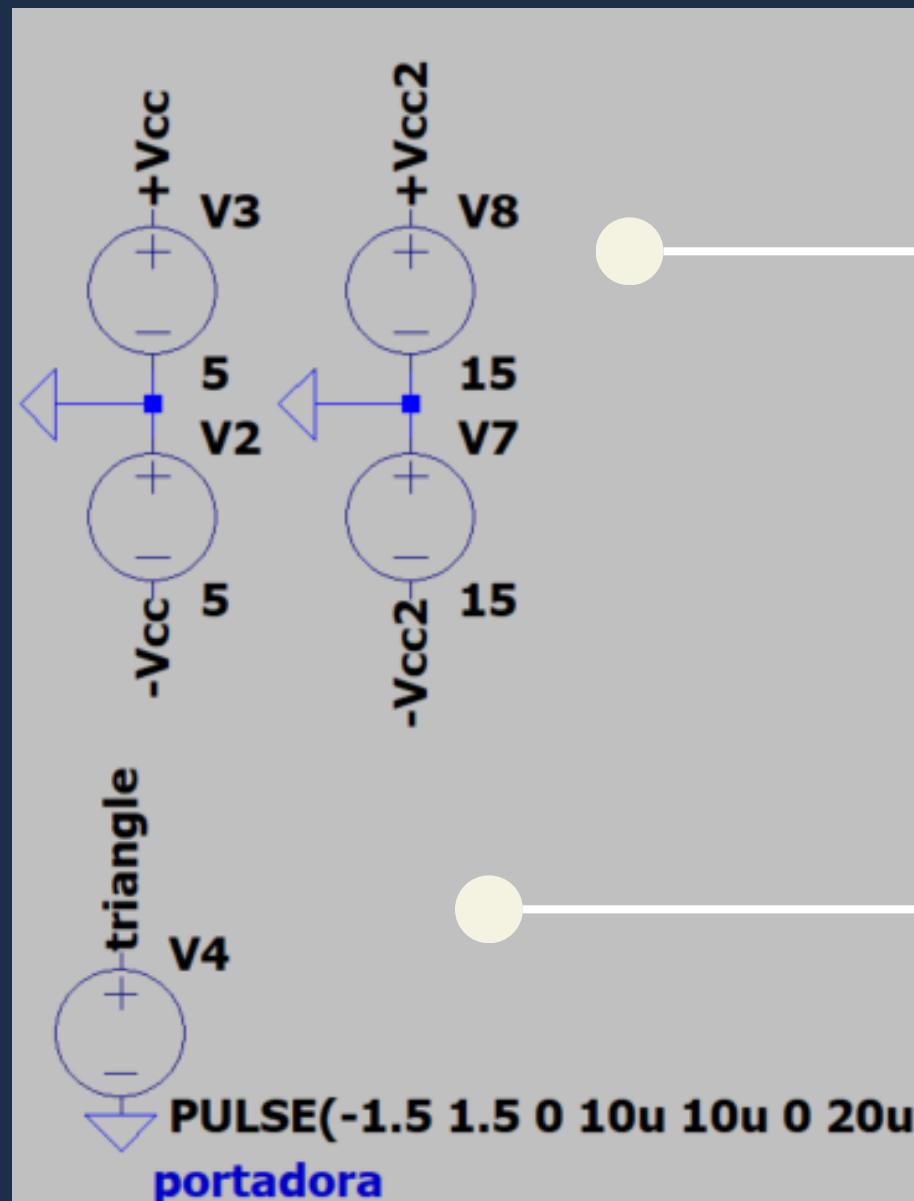


**MYSW**  
chave1  
chave2  
triangle



# EXPLICAÇÃO DO CIRCUITO

## GERADOR DE SINAIS DA PORTADORA



Fontes de alimentação de 5 e 15 V para os amplificadores operacionais.

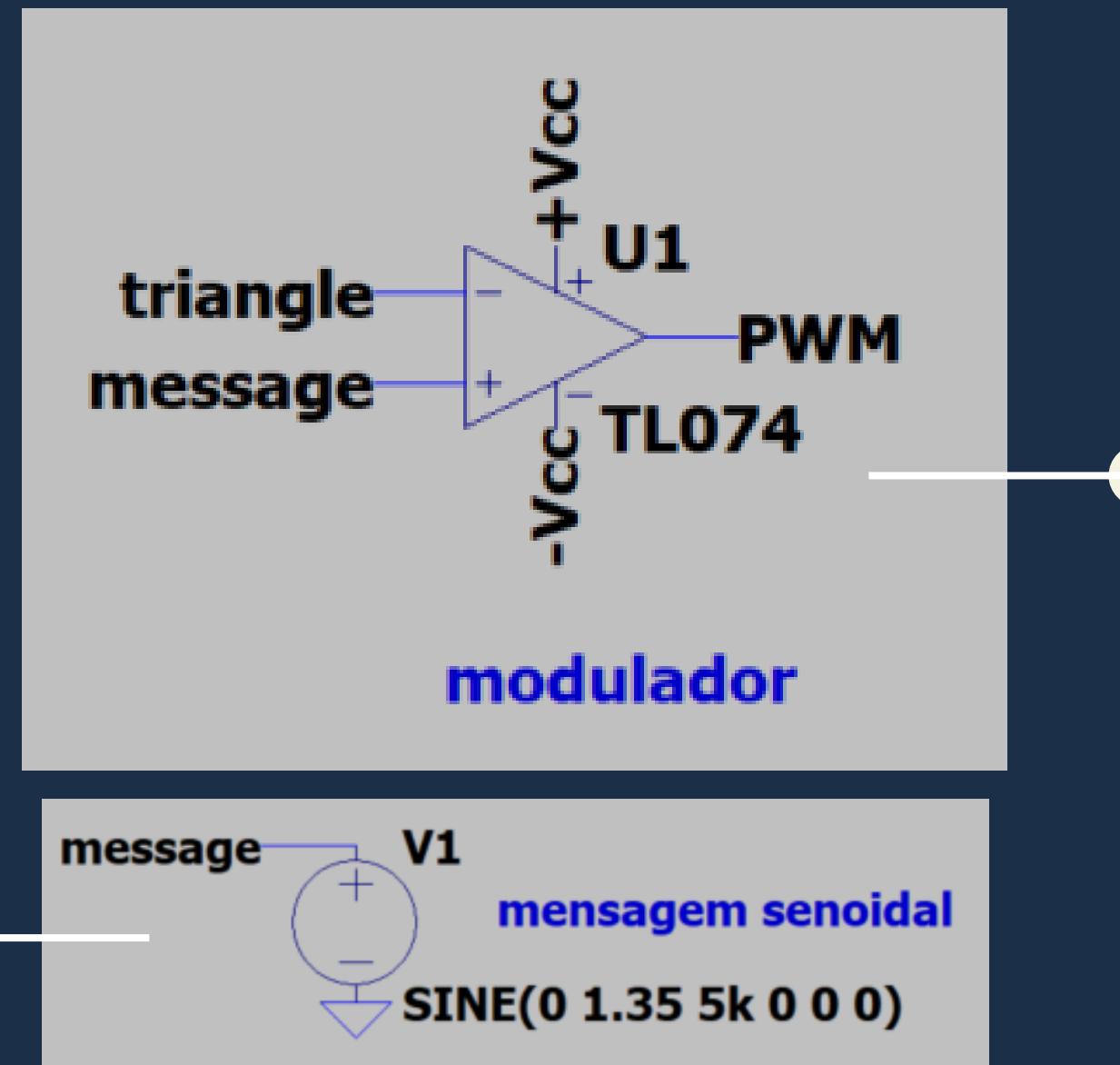
Gerador de sinais da portadora. Uso de uma onda triangular de 50 kHz e 3 Vpp

# EXPLICAÇÃO DO CIRCUITO

Índice de modulação em amplitude: 0,9  
Índice de modulação em frequência: 10  
  
Gerador de sinais da mensagem. Sinal senoidal de 5 kHz e 2,7 Vpp.

- Informação que será codificada na largura dos pulsos da forma de onda modulada.

## Modulador PWM



## AMP OP TL074

- Usado como modulador PWM configurado como comparador. Ele compara a tensão da portadora com a tensão do sinal de mensagem e de largura de pulso variável e amplitude 10 Vpp.
- Desfio: encontrar um amplificador com slew-rate suficientemente grande para gerar o sinal PWM.

TL074: 20 V/us  
TL741: 0,5 V/us

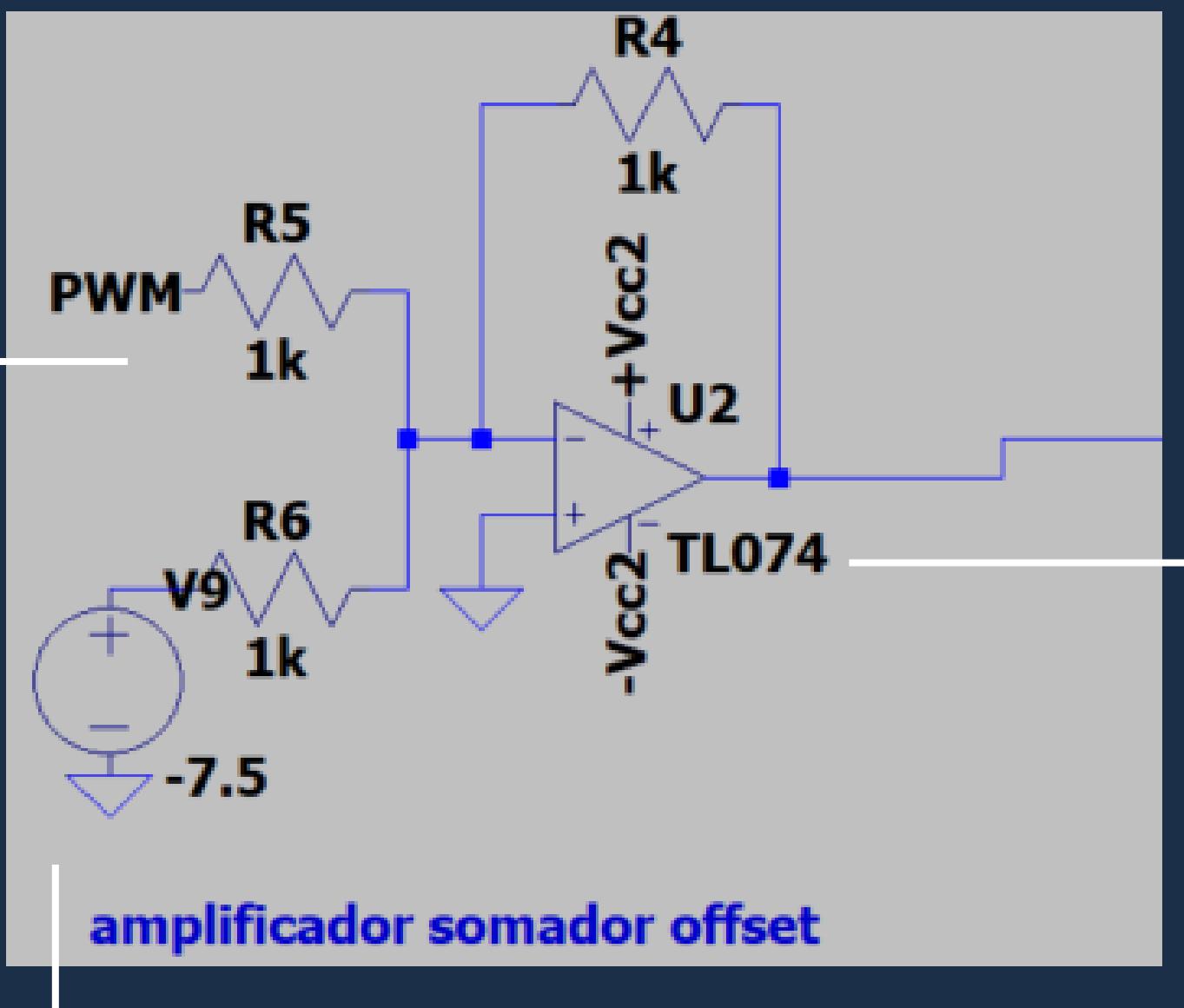
# EXPLICAÇÃO DO CIRCUITO

## Amplificador somador com offset

R4, R5 e R6

- Determinam os ganhos unitários de cada entrada do amplificador somador.

$$V_o = 7,5 - V(PWM)$$



AMP OP TL074

- Usado como amplificador e somador para inverter o sinal PWM e somá-lo a um offset.
- O resultado é uma forma de onda PWM com um valor médio deslocado em relação ao zero.

Fonte de tensão V9

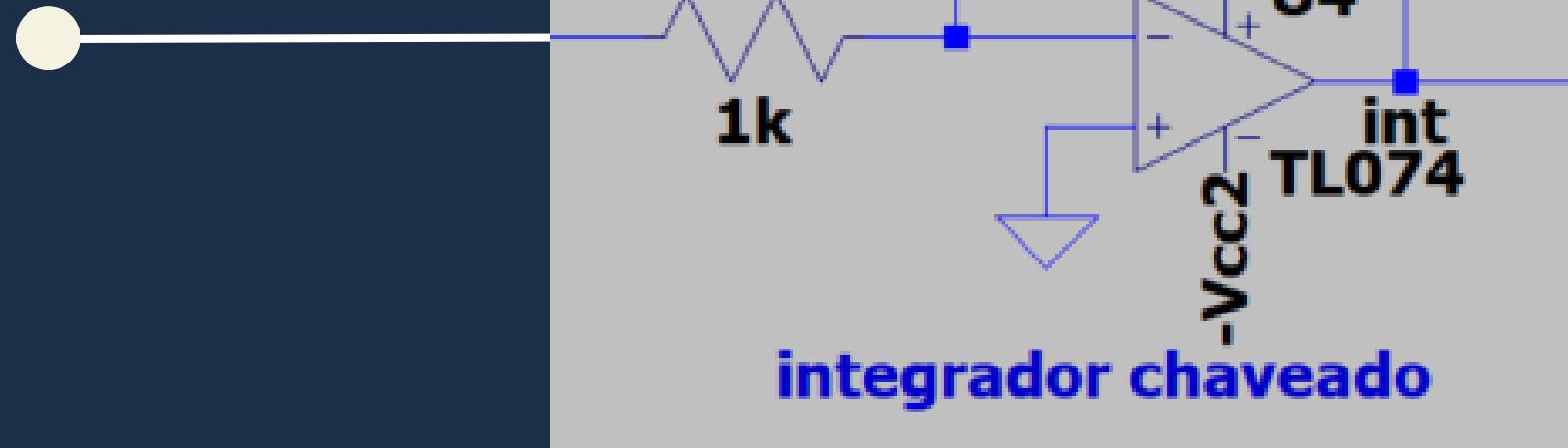
- Determina o deslocamento do sinal de saída.

# EXPLICAÇÃO DO CIRCUITO

## Integrador chaveado

### Resistor R1

- Limita a corrente que flui através do capacitor e controla a sua taxa de carga e descarga.



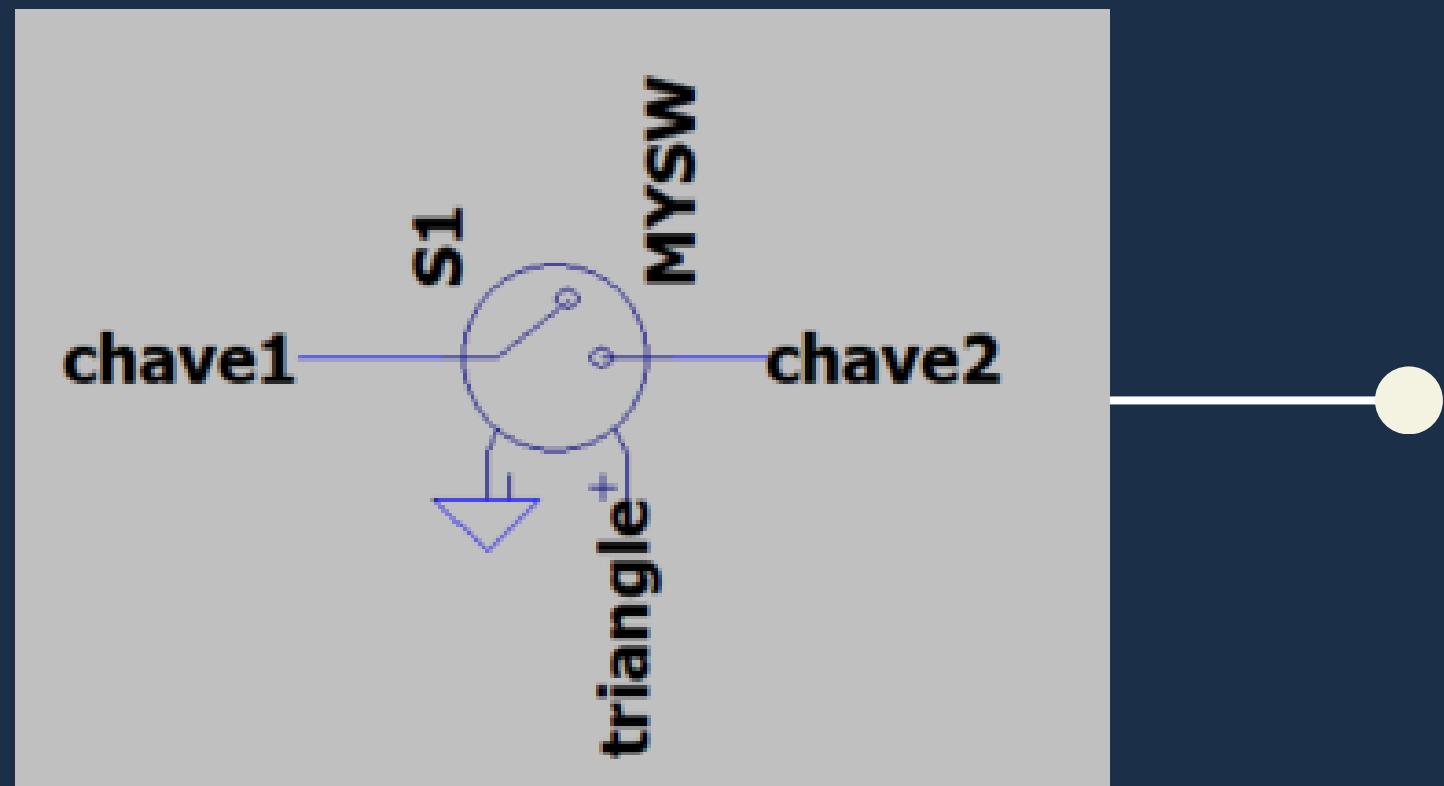
### Capacitor C1

- Responsável pela integração do sinal modulado, acumulando a área sob a curva do sinal ao longo do tempo.
- Constante de tempo ajustada para uma carga completa em um período da portadora.
- Chave coloca o capacitor em curto, descarregando-o.

R1 e C1 em paralelo juntamente com SI formam um circuito integrador chaveado, que é utilizado para converter o sinal modulado em uma forma de onda integrada, que será usada na etapa seguinte do circuito.

# EXPLICAÇÃO DO CIRCUITO

## Integrador chaveado



Interruptor controlado pelo sinal da portadora.

- Utilização de uma chave ideal para simulação LTSpice.
- Faz com que a integral seja reiniciada a cada período da portadora.

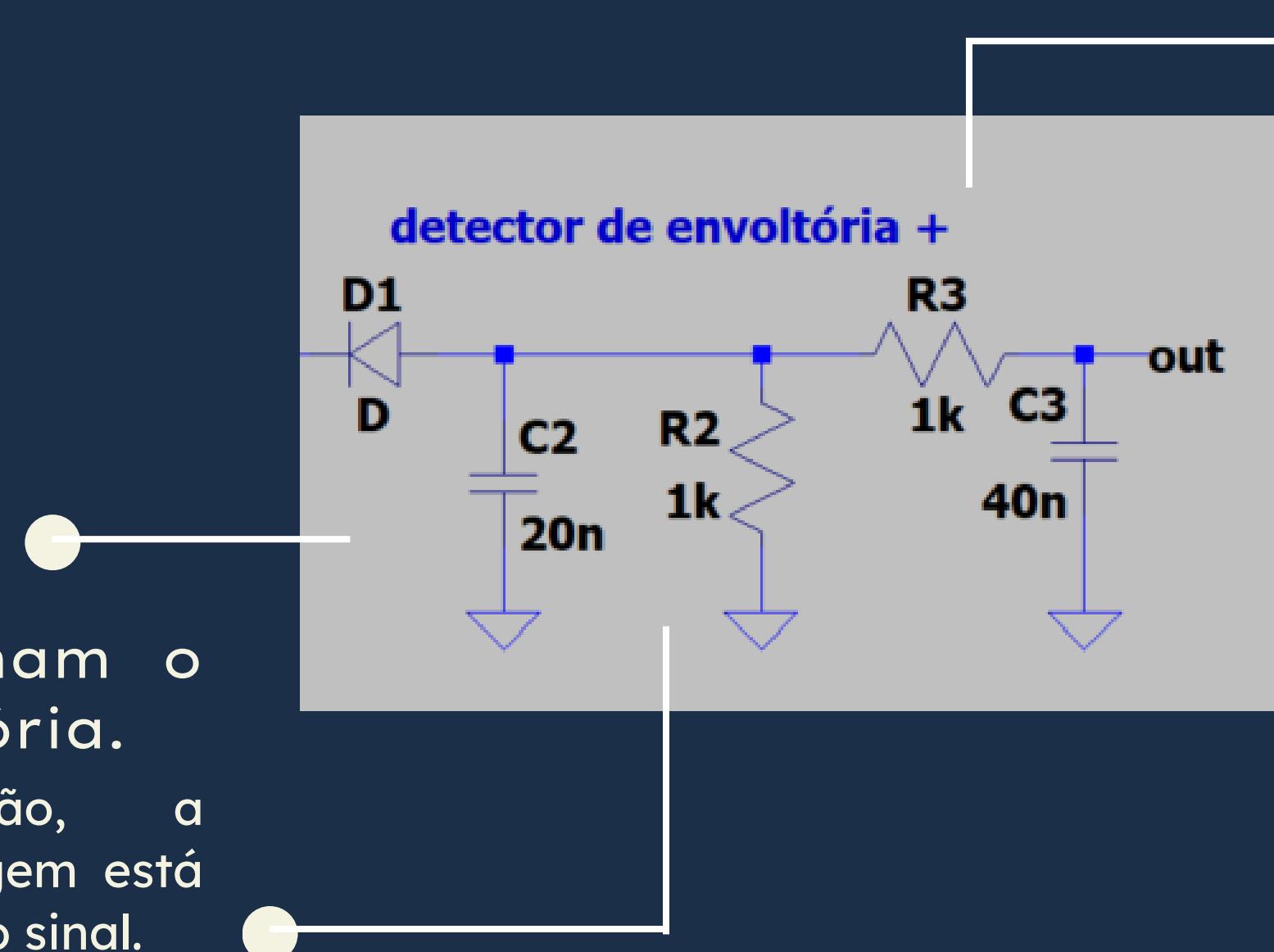
$$V_o = -\frac{1}{RC} \int_t^{t+T} V_{in} dt$$

# EXPLICAÇÃO DO CIRCUITO

Detecção de envoltória  
Análoga à demodulação AM

D1, C2 e R2 formam o detector de envoltória.

- Após a integração, a informação da mensagem está contida na envoltória do sinal.



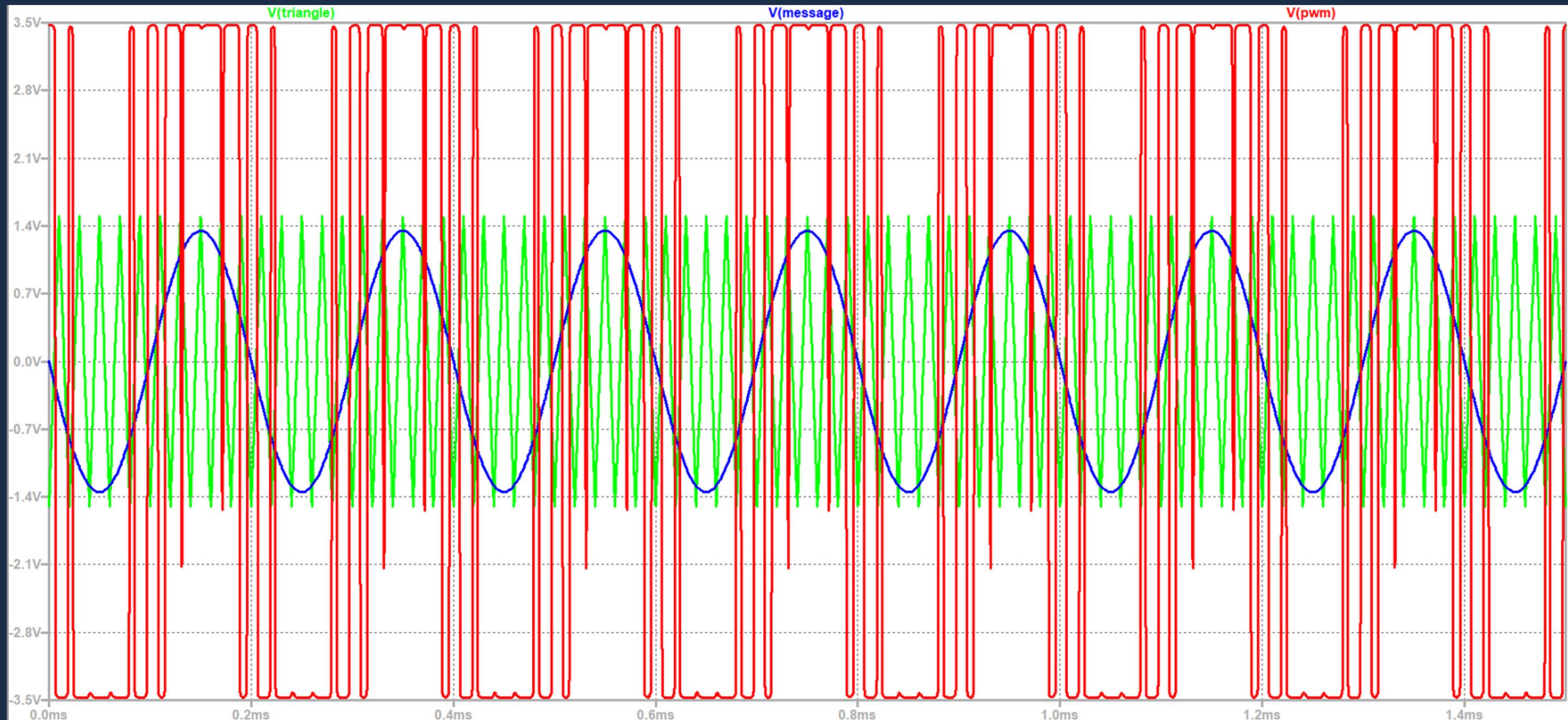
C3 e R3 formam um filtro passa baixas adicional após a detecção

- Remove componentes de alta frequência e ruídos, resultando em uma saída mais limpa e estável.

Sinal de saída é uma forma de onda que representa apenas o sinal modulado original.

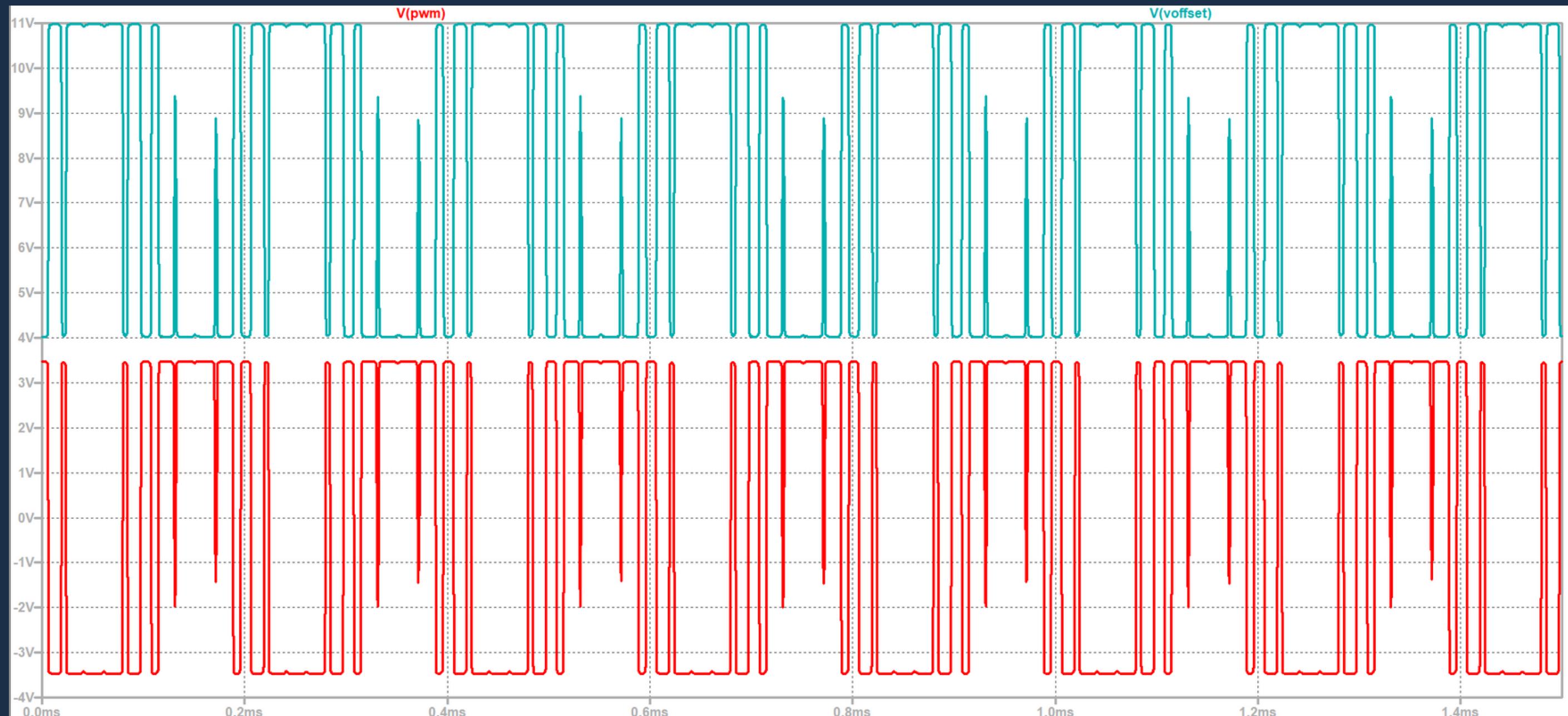
# RESULTADOS

## SIMULAÇÃO - MODULADOR PWM



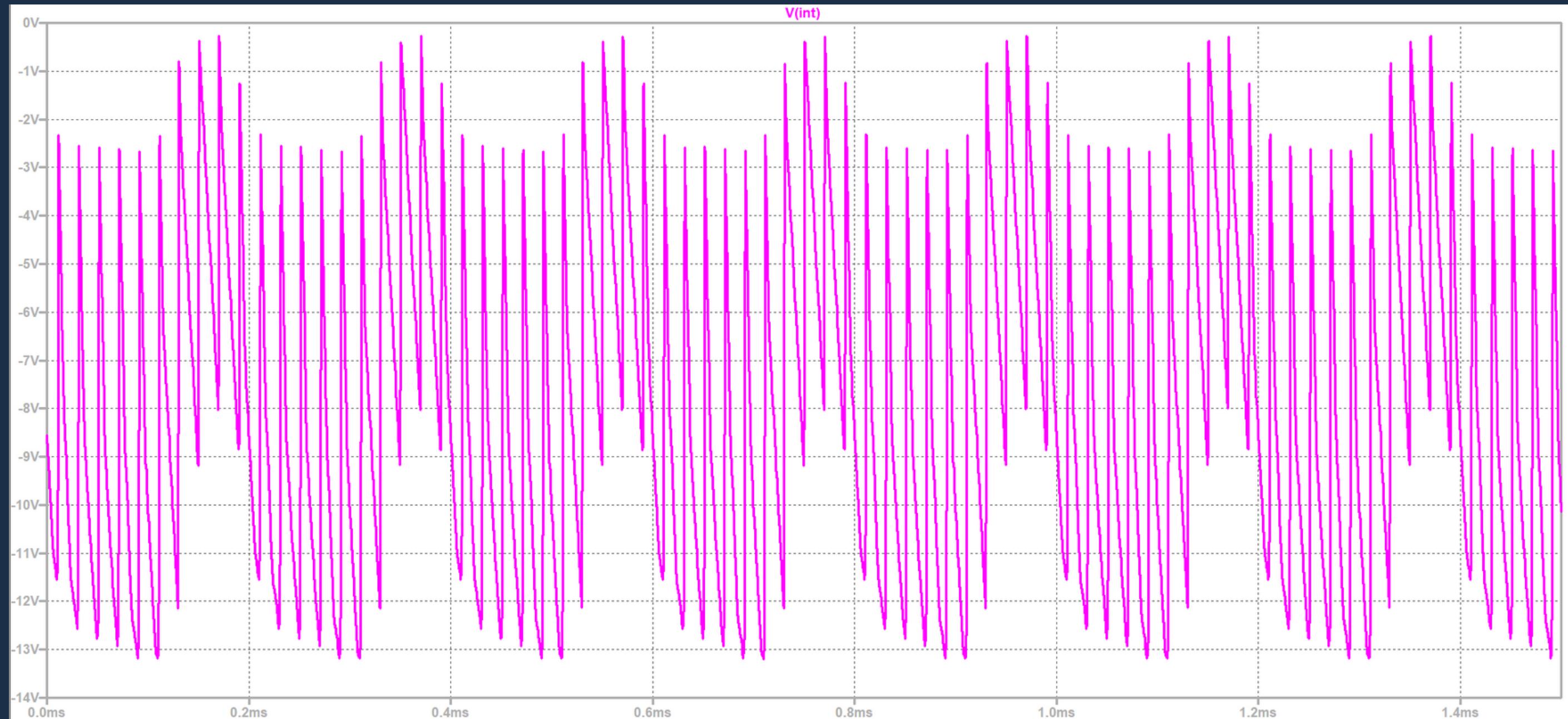
# RESULTADOS

## SIMULAÇÃO - SAÍDA AMPLIFICADOR SOMADOR OFFSET



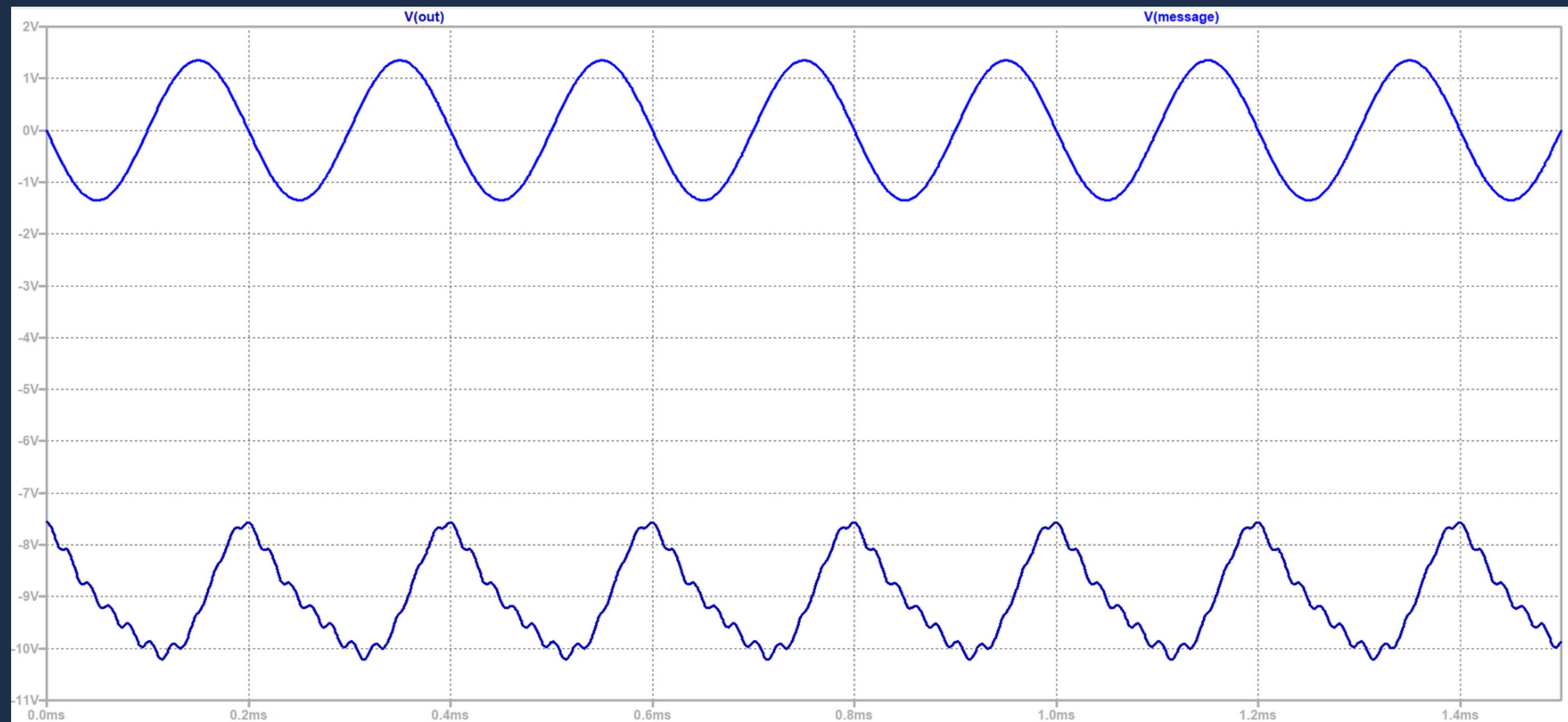
# RESULTADOS

## SIMULAÇÃO - SAÍDA INTEGRADOR CHAVEADO

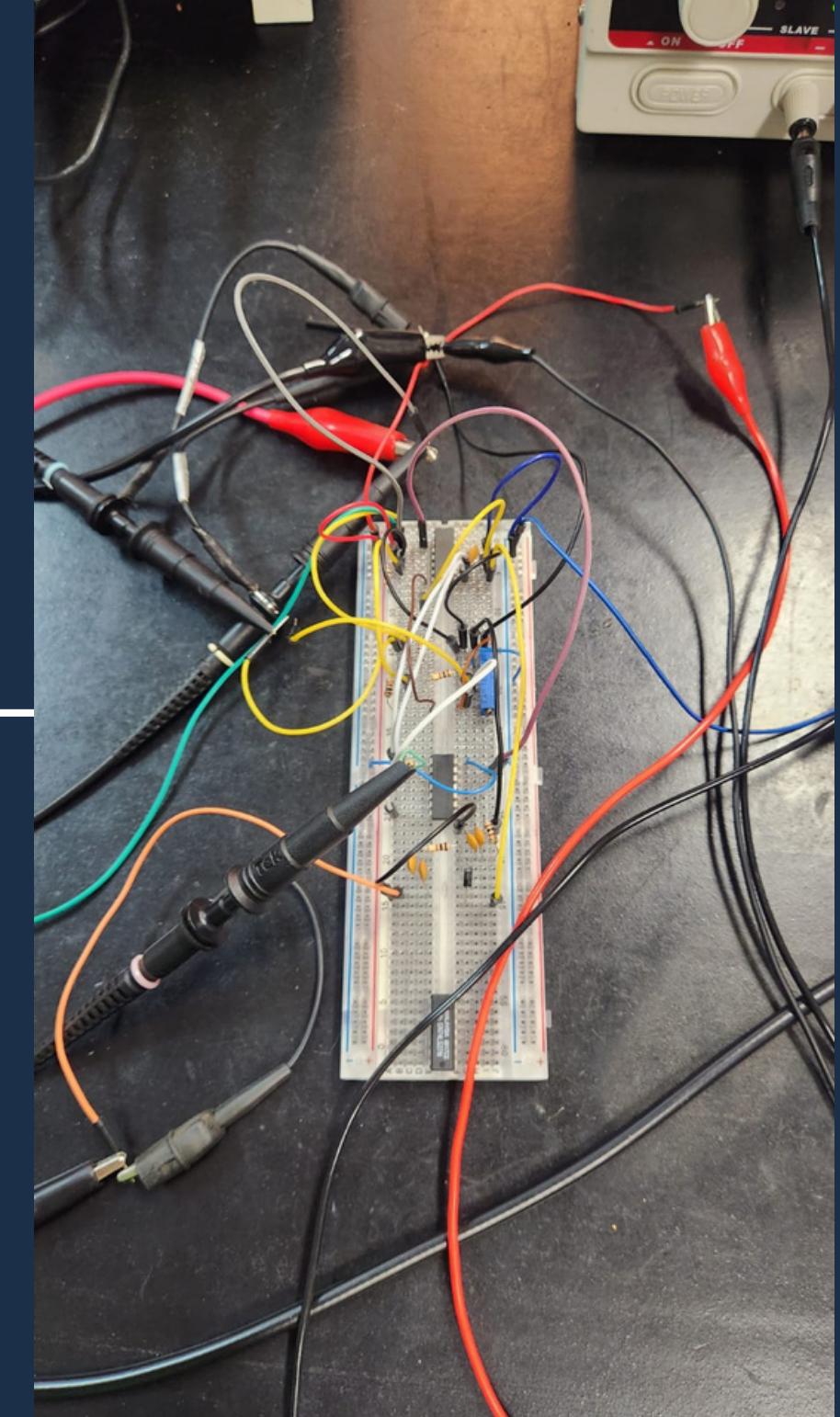
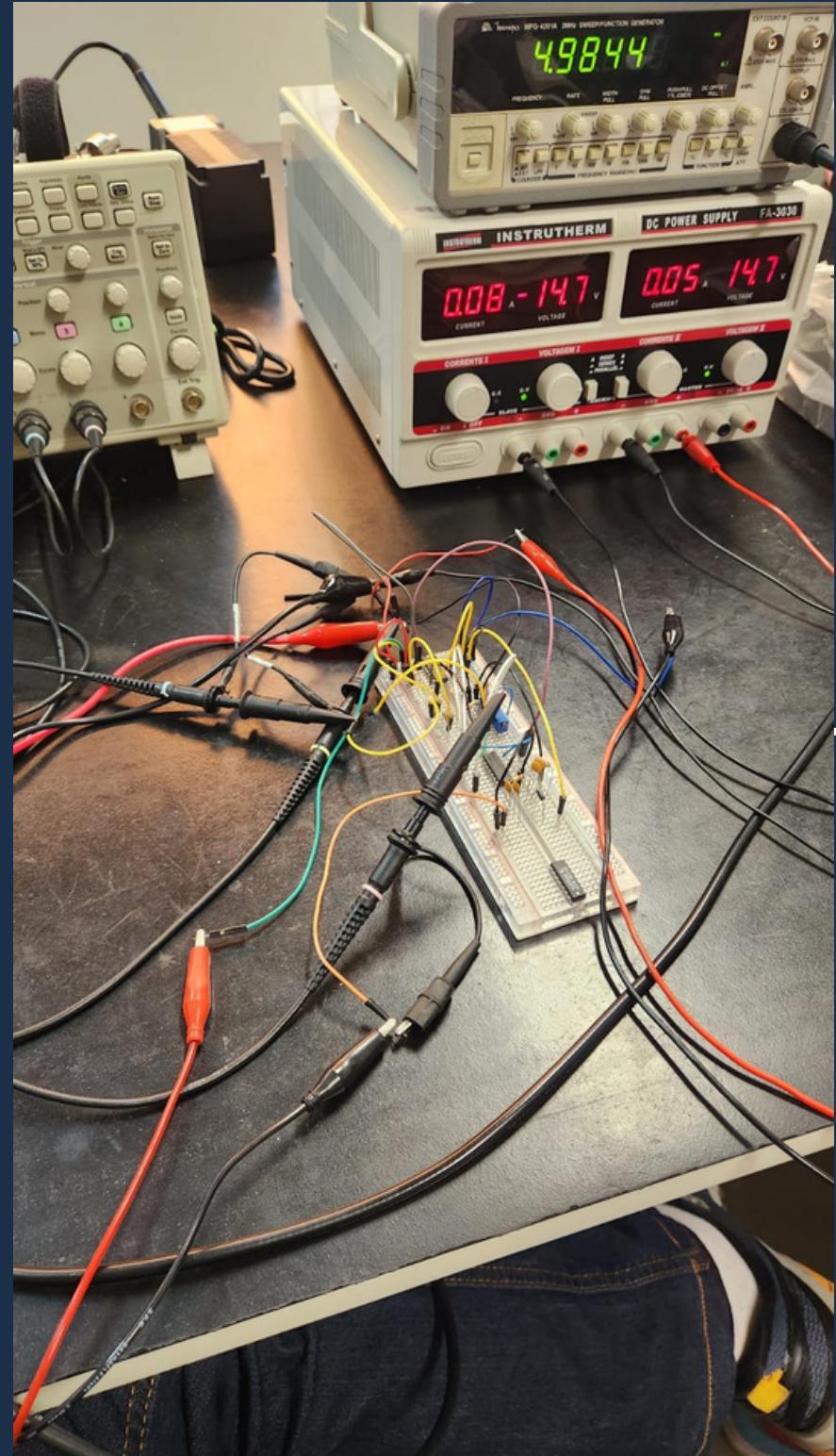


# RESULTADOS

## SIMULAÇÃO - SAÍDA DETECTOR DE ENVOLTÓRIA

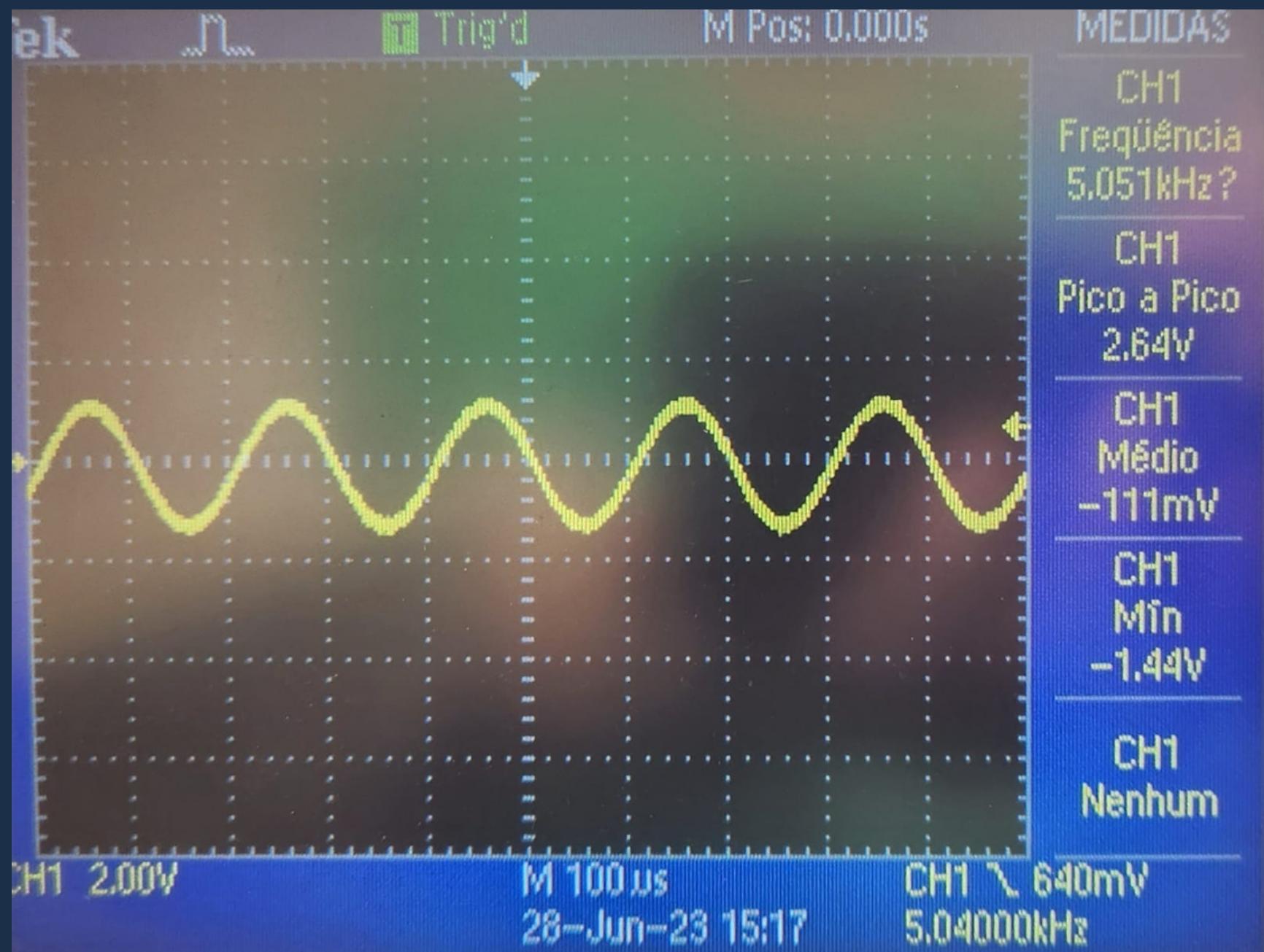
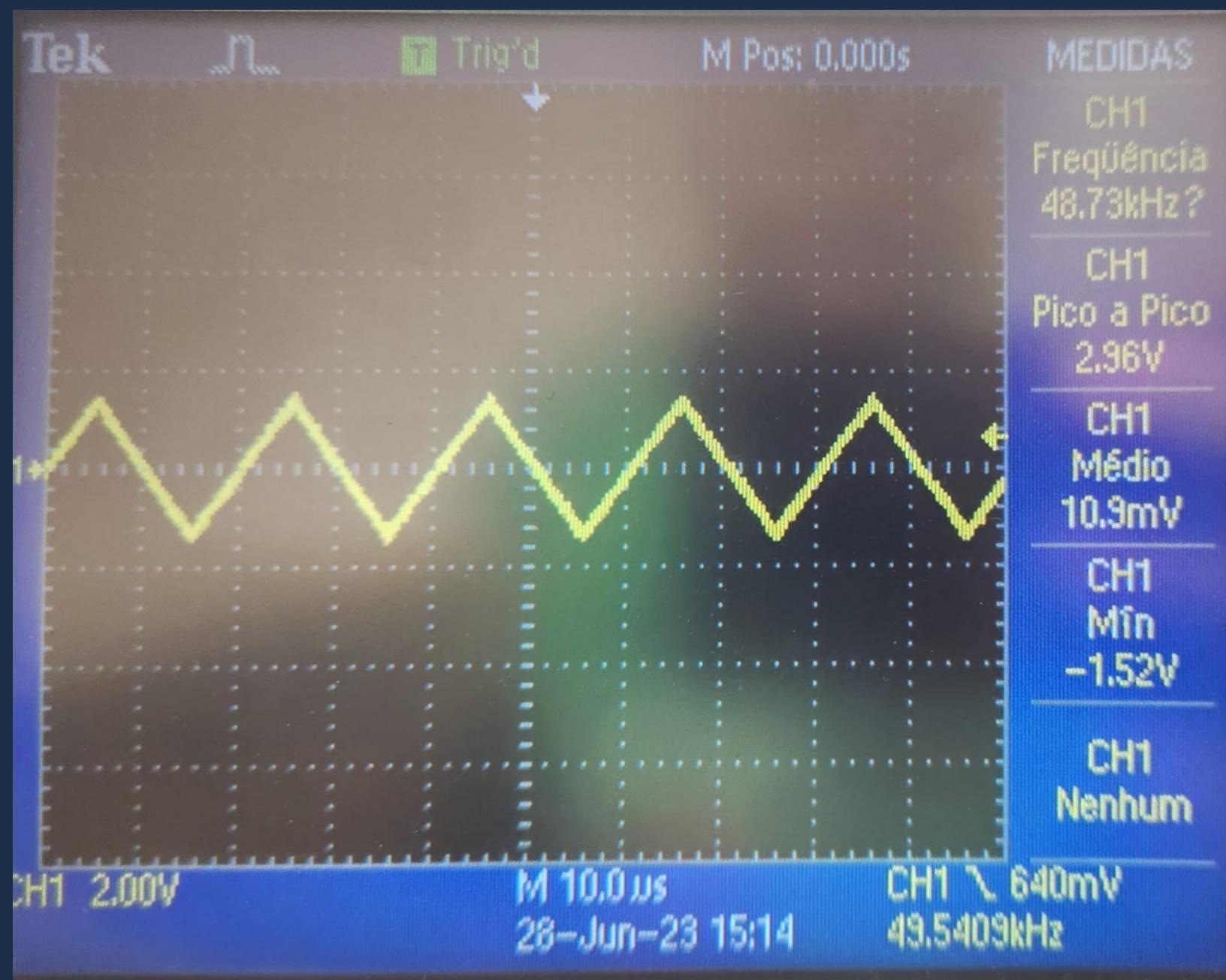


# MONTAGEM



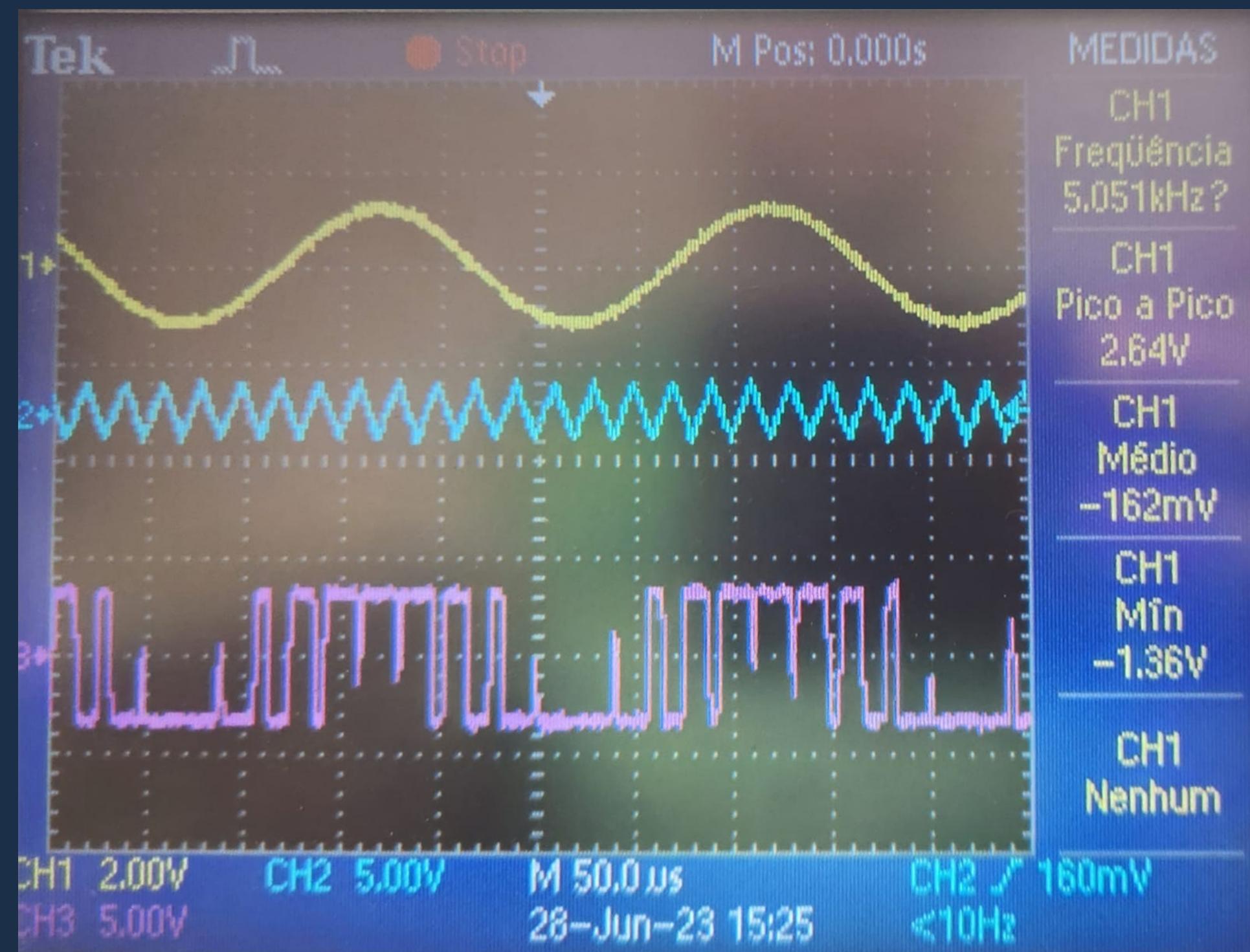
# RESULTADOS

## MONTAGEM - PORTADORA E MENSAGEM



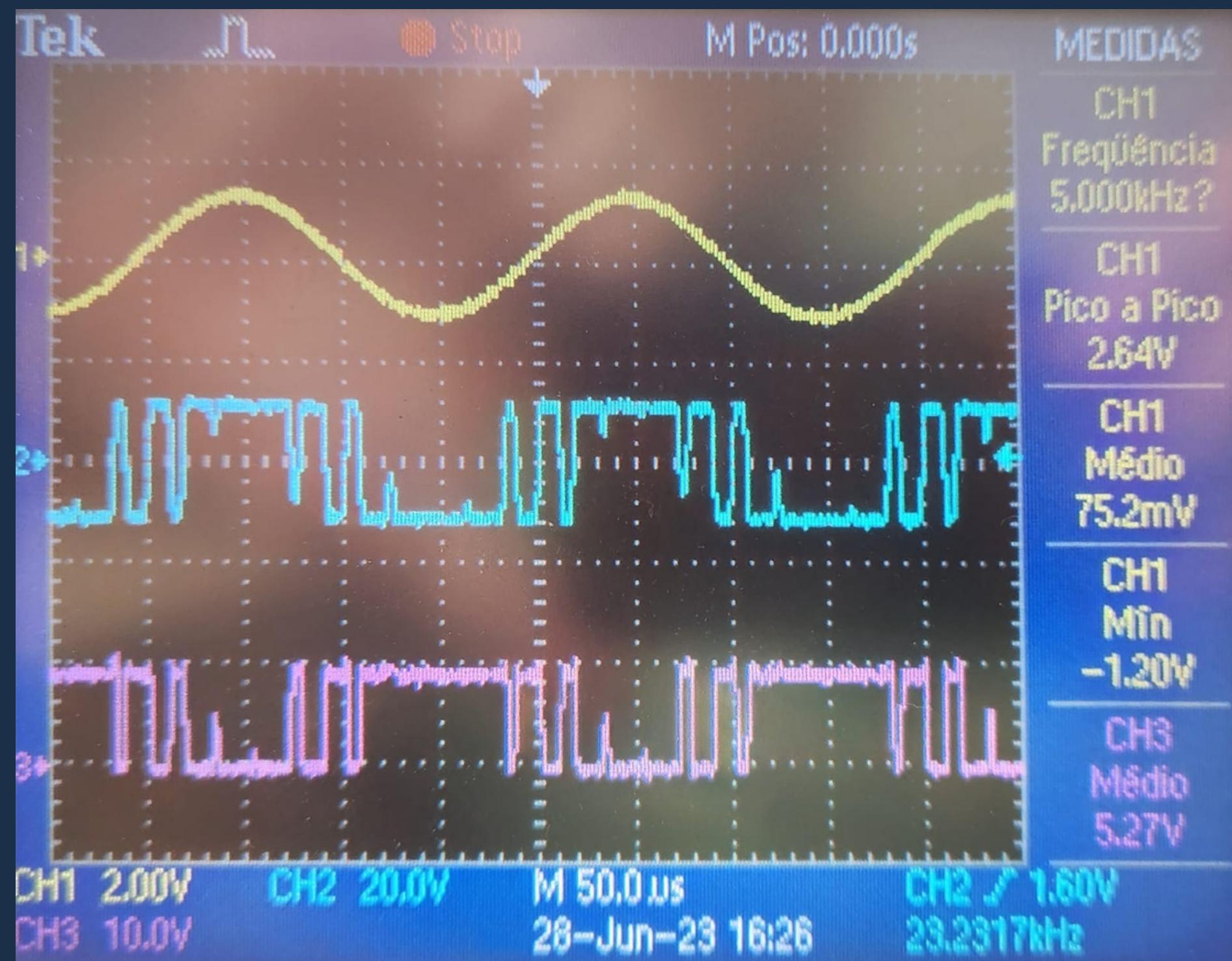
# RESULTADOS

## MONTAGEM - MODULADOR PWM



# RESULTADOS

## MONTAGEM - SAÍDA AMPLIFICADOR SOMADOR OFFSET

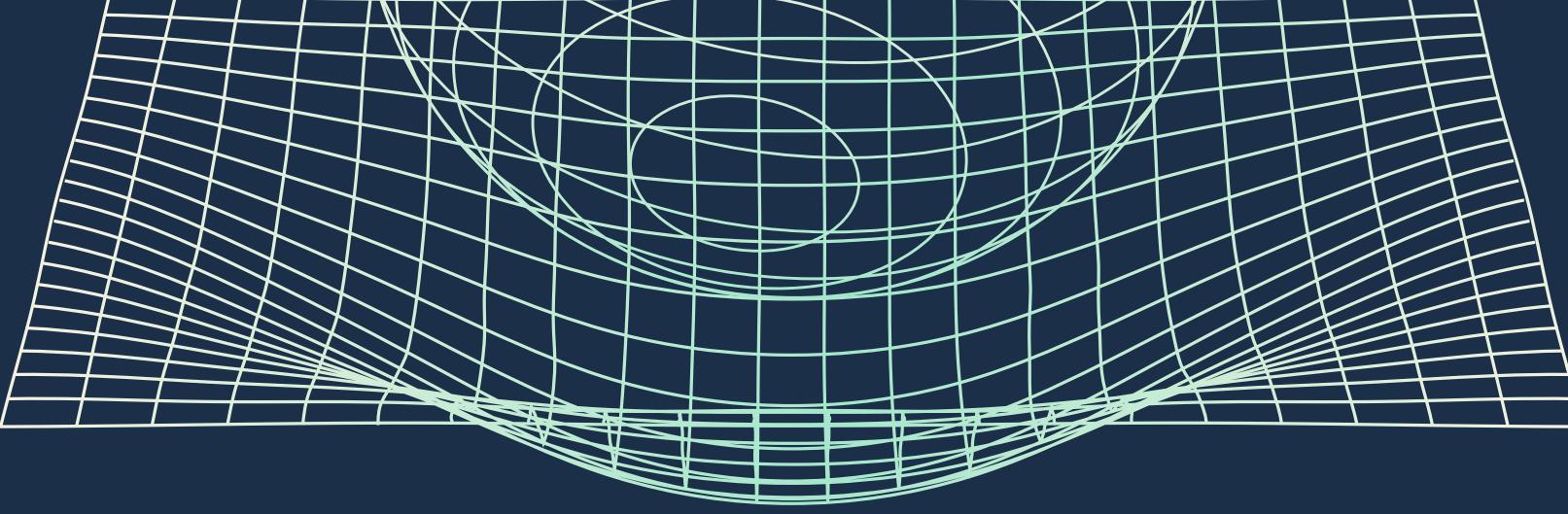


# RESULTADOS

## ERROS DE PROJETO

Efeito de carga: inicialmente, uso de divisor de tensão para a fonte V9. Efeito de carga devido à similaridade entre os valores de resistência do divisor e do circuito ( $1\text{ k}\Omega$ ). Substituição por um trimpot de  $50\text{ }\Omega$  e ajuste fino manual.

CD4066: não aceita na entrada tensões negativas. Como o integrador inverte o valor do sinal, não houve chaveamento adequado.



# REFERÊNCIAS

<https://www.citisystems.com.br/pwm/>

<https://www.mundodaeletrica.com.br/pwm-o-que-e-para-que-serve/>

<https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a>

<https://eltgeral.com.br/o-que-e-pwm/>

<https://www.youtube.com/watch?v=KaVCROF5rKE>

<http://www.bosontreinamentos.com.br/electronica/curso-de-electronica/curso-de-electronica-o-que-e-pwm-pulse-width-modulation/>

<https://www.youtube.com/watch?v=qVmE9R5-I8A>

