Módulo 2: I/O, Temporizadores e Interrupções

ORIENTAÇÕES:
O segundo módulo do laboratório de Sistemas Microprocessados faz uso da linguagem C e agrupa exercícios de entrada/saída de dados, temporizadores e interrupções. O módulo é composto por 17 exercícios e pelo Problema 2. Os exercícios são propostos para permitir o desenvolvimento modular do Problema 2. Não há a necessidade de apresentar vistos para os exercícios, **apenas o Problema 2 deverá receber visto** e será corrigido mediante o envio do código fonte pelo ambiente de ensino online "Aprender".

OBJETIVOS DESTE MÓDULO:
- Praticar o controle das portas de entrada e saída (GPIO).
- Gerar atrasos com laços de programa e entender o uso de temporizadores.
- Compreender o funcionamento de interrupções.

Configuração de I/O

Configurações de microcontroladores são feitas alterando-se individualmente bits de registros de configuração. É o caso, por exemplo, dos pinos de entrada e saída, com seus registros de configuração PxDIR, PxIN, PxOUT, PxREN. Em assembly, usamos as instruções de acesso direto aos bits, como BIC (bit clear) BIS (bit set) e XOR (ou exclusivo). Na linguagem de programação C, utilizaremos atribuições com base nas mesmas operações lógicas.

```
/* Configurar a porta P3.5 como entrada com resistor de pull-down */
P3DIR = P3DIR & ~(BIT5);   // Configura pino como entrada (zera o bit 5 de P3DIR)
P3REN = P3REN |  (BIT5);   // Ativa o resistor (habilita o bit 5 de P3REN)
P3OUT = P3OUT & ~(BIT5);   // Seleciona o resistor de pull-down
```

Perceba que as instruções que habilitam o bit (colocam o bit em '1') usam a operação lógica OU e as instruções que limpam o bit (colocam o bit em '0') usam a operação lógica E e invertem a máscara. Essas mesmas instruções podem ser reescritas na forma compacta. **É recomendado o uso da forma compacta.**

```
                           // Configura a porta P3.5
P3DIR &= ~BIT5;            // Pino de entrada (P3.5)
P3REN |=  BIT5;            // Habilita o resistor
P3OUT &= ~BIT5;            // Pull-down
```

Para alternar o valor de um bit, use a operação XOR

```
P1OUT ^=  BIT5;            // Alterna o bit P1.0 (LED vermelho).
                           // Se for 0 vai para 1, Se for 1 vai para 0.
```

	Bit Set		Bit Clear		Bit Toggle	
	0000.1111		0000.1111		0000.1111	← Registro
(OU) |	0010.0000	(E) &	1111.1011	(XOR) ⊕	0001.1000	← Máscara
	0010.1111		0000.1011		0001.0111	← Resultado

Da mesma forma que fizemos em assembly, será necessário tratar os rebotes das chaves mecânicas, vide figura 1. A estratégia usada em microcontroladores é, ao perceber uma transição da chave, esperar um certo tempo para que os rebotes acabem e só então prosseguir com o programa. O fluxograma da figura 2, ilustra esse conceito. Note que é necessário gastar tempo tanto no momento que pressionamos o botão quanto no momento que soltamos o mesmo. A caixa denominada debounce apenas consome um tempo pré-determinado (empiricamente).

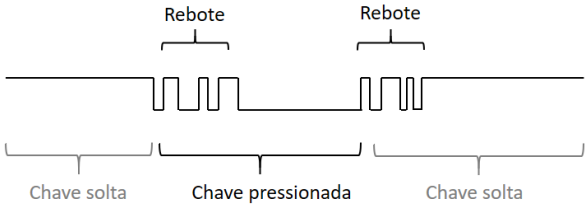


Figura 1a – Rebotes gerados pelas chaves mecânicas

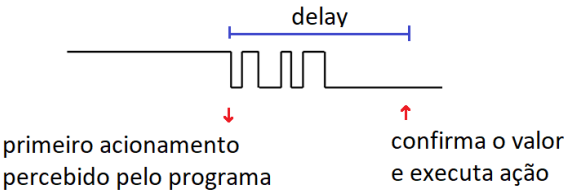


Figura 1b – Estratégia para remoção de rebotes (debounce)

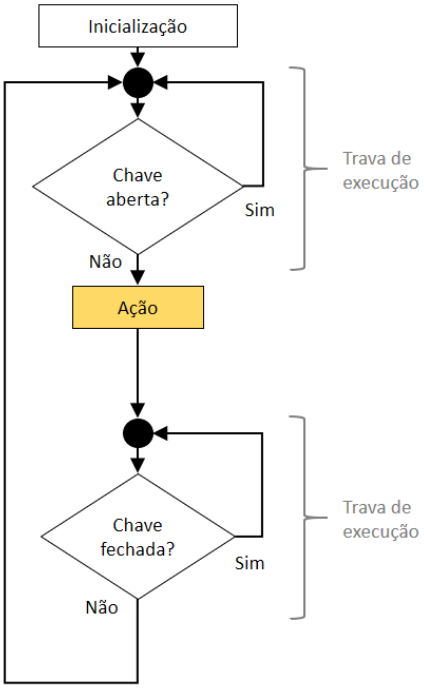


Figura 2a – Fluxograma de ação sem remoção de rebotes (sem debounce).

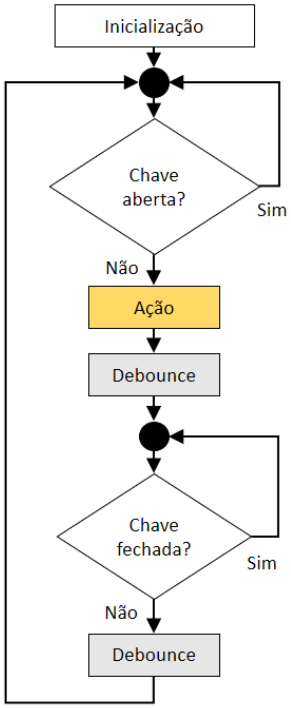


Figura 2b – Fluxograma de ação com remoção de rebotes (com debounce)

Os fluxogramas apresentados na figura 2 são pouco eficientes, pois "prendem" o processador esperando a chave abrir ou fechar. Nenhuma outra tarefa pode ser executada pela CPU. Uma situação mais realista é a de quando se precisa monitorar uma chave **e também** executar uma certa tarefa de tempos em tempos. Isto significa que o processador não pode "ficar preso" esperando pela alteração na chave. A solução para este caso está apresentada na figura 3. Note que são levados em conta dois parâmetros: o estado atual da chave e o estado anterior da chave.

O fluxograma abaixo permite executar a tarefa e monitorar a chave simultaneamente. O programador decide onde ele vai realizar suas ações em função dos estados da chave.

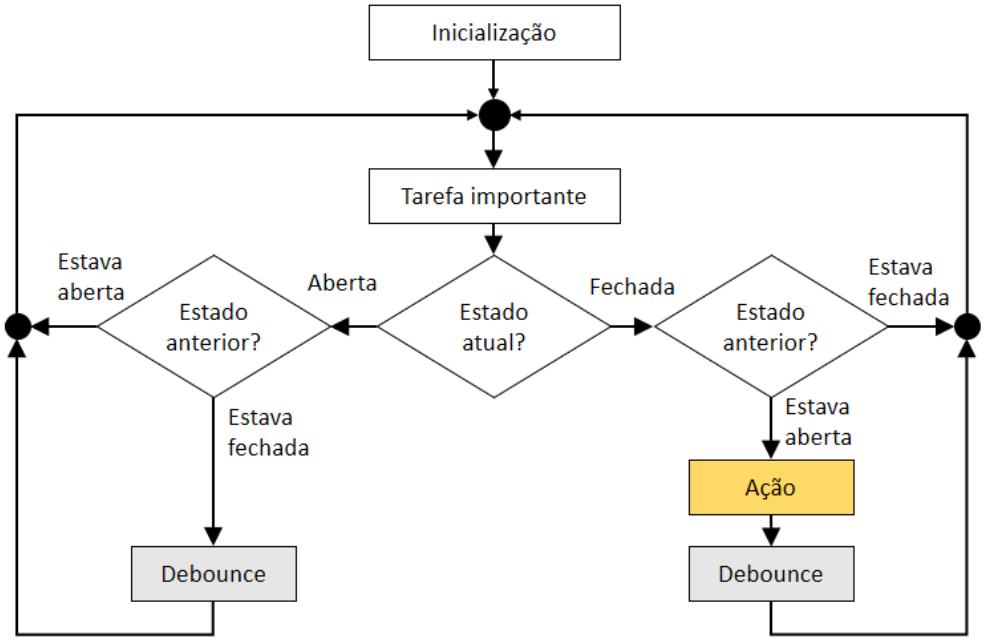


Figura 3 – Fluxograma para monitorar uma chave sem "prender a execução".

Exercícios:

Exercício 1: Configuração dos pinos
Escreva um programa que faça o LED verde imitar o estado da chave S1. Ou seja, se S1 estiver pressionado o LED deverá estar aceso, se estiver solto, o LED deve apagar.

Exercício 2: Ruído de chaves mecânicas
Escreva na função `main()` uma rotina que alterne o estado do LED vermelho toda vez que o usuário apertar o botão S1. Não remova os rebotes. *Você irá perceber que o programa nem sempre funciona.*

Exercício 3: Remoção de rebotes
Refaça o exercício 2 removendo os rebotes das chaves. Para isso, defina uma função `debounce()` que consome tempo do processador através de um loop que decremente uma variável. Não deixe de declarar a variável como **`volatile`** para evitar que o recurso de otimização do compilador a remova.

Exercício 4: Trava de execução com condições mais elaboradas.
Escreva na função main() uma rotina que alterne o estado do LED vermelho toda vez que o usuário apertar o botão **S1 ou S2**.

Exercício 5: Múltiplas ações
Escreva um programa que alterne o estado dos dois LEDs ao pressionar S1 e alterne apenas o estado do LED verde ao pressionar S2. Se ambos os botões forem pressionados, os LEDs apagam.

Exercício 6: Máquina de estados
Programe um contador binário de 2 bits, visualizado através dos LEDs. Use o LED verde como LSB e o vermelho como MSB. Os LEDs iniciam apagados. O contador deve incrementar a cada acionamento de S2 e decrementar com S1. É necessário eliminar os rebotes das chaves.

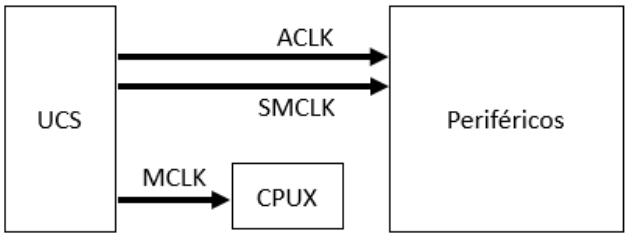
Exercício 7: Mini-problema
Neste exercício, iremos programar um jogo de adivinhação. O jogador deve adivinhar um número de 1 a 6. A cada rodada, o jogo gera um novo número e o jogador deve tentar adivinhar apertando N vezes o botão S1. Tendo feito a escolha, o jogador aperta o botão S2 e verifica se acertou ou não. Se o LED vermelho acender, significa que ele errou. Se o LED verde acender, significa que o jogador acertou e nesse momento o jogo gera um novo número. Use a rotina abaixo para gerar um número pseudo-aleatório.

```
unsigned char rand() {
    static unsigned char num = 5;
    num = (num * 17) % 7;
    return num;
}
```

Temporizadores e interrupções

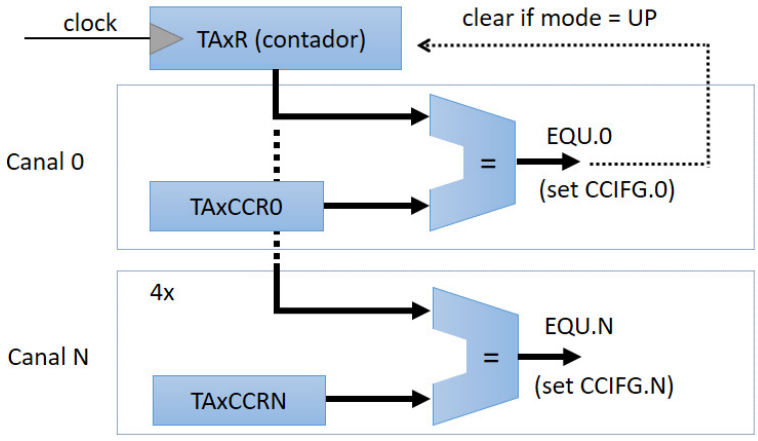
Temporizadores, ou simplesmente *timers* em inglês, são peças fundamentais em sistemas embarcados. *Timers* permitem que uma referência de tempo seja usada em aplicações que demandam sincronismo ou precisão temporal. A linguagem de programação C não possui a noção de tempo. Cada linha de código é executada sequencialmente, uma após a outra, e não há nada na linguagem que indique a velocidade ou tempo de execução do programa. A única forma de sabermos o tempo que leva para cada instrução executar é conhecendo o hardware em que o programa está rodando e principalmente a velocidade do clock que bate e dá o ritmo de execução das instruções. O MSP430 possui um módulo específico para a configuração dos clocks que são distribuídos no sistema chamado de *Unified Clock System* (UCS).

É no UCS que configuramos a frequência de cada clock. Para este módulo a configuração do UCS será dada. Leia atentamente o código fornecido para entender o seu funcionamento. Você irá notar que MCLK está sintonizado em 16MHz, SMCLK em 1MHz e ACLK em 32768Hz.



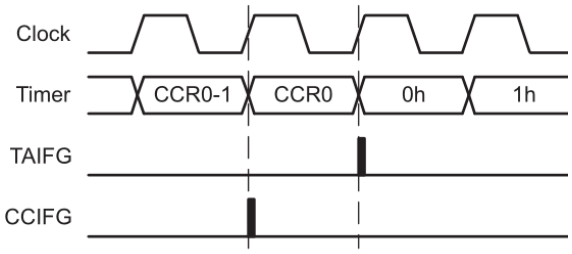
O timer A possui um contador (**TAxR**) que incrementa o seu valor a cada batida do clock. O valor do contador é comparado com limiares definidos nos registros de comparação **TAxCCRn**. No MSP430F5529, temos 5 canais de comparação no timer A0 e 3 canais para os timers A1 e A2. Quando o valor do contador chega num limiar pré-estabelecido, o sinal de igualdade (EQU.N) se torna '1'.

O canal 0 é especial. Ele é o único capaz de zerar o contador quando o limiar é atingido. Dizemos então que o registrador de comparação do canal 0 (TAxCCR0) possui o significado de teto de contagem.



O timer A pode usar como clock de entrada (referência de tempo) o ACLK ou o SMCLK. Temos então duas escolhas com um compromisso entre precisão e tempo máximo de contagem. O contador é limitado em 16-bits e só pode contar até 0xFFFF, ou seja 65535. Usando ACLK, cada passo do contador equivale a 1/32768Hz = 30,5us e podemos contar até 2 segundos no máximo. Já com SMCLK, cada passo vale 1/1MHz = 1us, um passo mais fino que do ACLK, entretanto, só podemos contar até 65,5ms no máximo.

Quando o contador (TAxR) atinge o valor de um dos registros de comparação (TAxCCRn), a flag correspondente do canal (CCIFG) é habilitada e quando ele volta a zero, a flag de overflow (TAIFG) é habilitada como na imagem abaixo.



Perceba que as flags são resetadas rapidamente. Isso acontece pois é o processador que se encarrega de limpar essa flag e o processador opera com um clock mais rápido que o timer. Se usarmos a técnica de amostragem, é possível travar o programa até que o timer tenha contado até o valor do contador da seguinte forma:

```
TA0CCR0 = 100;                          // Conta 100 batidas do SMCLK
TA0CTL  = TASSEL__SMCLK | MC__UP;       // Seleciona SMCLK como ref. e inicia timer
while(!(TA0CCTL0 & CCIFG));             // Aguarda o final da contagem
TA0CCTL0 &= ~CCIFG;                     // Zera a flag CCIFG
```

Atenção, ao usarmos a flag de overflow TAIFG, precisamos configurar TA0CCR0 para N-1.

Para encontrarmos a quantidade de batidas de clock necessária para contarmos um tempo pré-definido, usamos a relação:

$$N = \frac{Tempo}{T_{CLK}}$$

Onde T_{CLK} é o período do clock e N é o número de batidas de clock, ou seja, o valor que iremos colocar no comparador (TAxCCRn).

Exercícios:

Exercício 8: Temporização imprecisa
Ainda sem usar timers (use laços de programa) faça o LED piscar em aproximadamente 1Hz, ou seja, fique 500ms apagado e 500ms aceso. *Você irá perceber que o uso de laços para consumir tempo não produz um resultado muito preciso. Isso acontece porque não temos precisão fina sobre a quantidade de ciclos que o código gerado pelo compilador consome. Podemos melhorar o controle do tempo se utilizarmos timers.*

A partir do exercício 9, é necessário o uso do código de inicialização dos clocks do sistema que irá configurar os clocks para: **ACLK @32768 Hz, SMCLK @1MHz** e **MCLK @16MHz.**

Exercício 9: Amostrando flags do timer
Escreva um programa em C que faça piscar o LED verde (P4.7) em exatamente 1Hz (0,5s apagado e 0,5s aceso). Use a técnica de amostragem (polling) da flag do canal 0 (CCIFG de TA0CCTL0) do timer para saber quando o timer atingiu o valor máximo.

Interrupções do timer

Interrupções, como o próprio nome já indica, interrompem o funcionamento do programa principal e executam uma rotina de tratamento de interrupção (ISR – Interrupt Service Routine). O modelo de programação que usamos até agora é chamado de "loop infinito", onde toda a funcionalidade se concentra na rotina principal (main). O modelo de programação a base de interrupções implica em distribuir funcionalidades para as ISRs como na figura abaixo. Como as interrupções tem uma prioridade de execução maior que a rotina principal, dizemos que o código que vai na `main()` é uma tarefa que roda em plano de fundo. As interrupções dos timers podem ser configuradas pelos habilitadores locais TAIE, para o evento de overflow e CCIE para cada canal do timer. Para as interrupções serem recebidas pelo processador, devemos também habilitar o bit GIE do registro de status (SR) com `__enable_interrupt();`

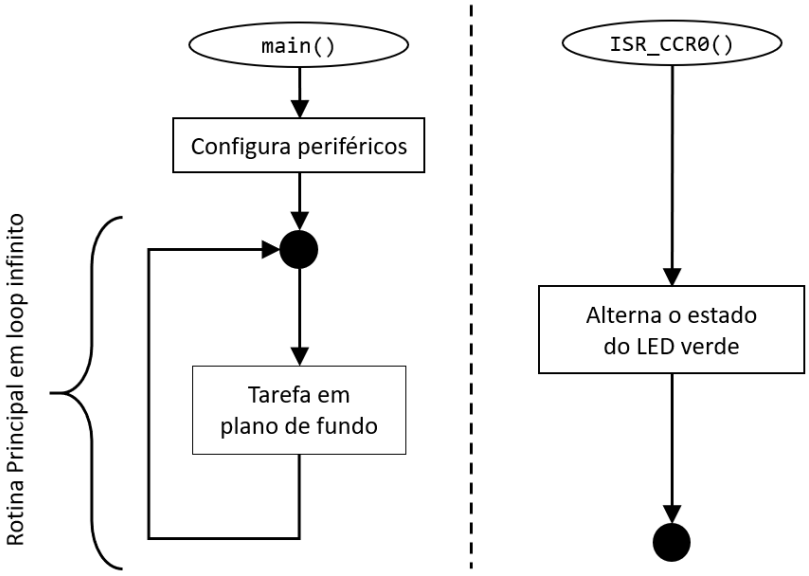


Figura 4: Modelo de programação a base de interrupções

A função que trata a interrupção é declarada de maneira especial. Ela possui uma linha antes do nome da função que o compilador usa para mapear a função para a devida interrupção. Além disso, note que a função foi declarada com o modificador". Esse modificador impede que o compilador remova essa função do código já que ela não é usada na rotina principal. Interrupções não são chamadas pelo usuário/programa. **Interrupções são chamadas por eventos de hardware.**

As rotinas de interrupção são declaradas em C da seguinte forma:

```
#define TA0_CCR0_INT 53              // Prioridade da ISR do canal 0 do timer A0
...
#pragma vector=TA0_CCR0_INT          // Pragma usado para mapear a função abaixo
__interrupt void TA0_CCR0_ISR() {    // para a ISR do CCR0 de TA0
    P1OUT ^= BIT0;                   // Código executado quando TA0R == CCR0
}
```

A ISR mostrada no exemplo acima é acionada toda vez que o contador TAxR chegar no valor do comparador do canal 0 (TAxCCR0). A ISR do canal 0 é separada dos demais canais pelo significado especial que esse canal possui (teto de contagem). Todas as demais interrupções dos outros canais e do overflow do contador são *agrupadas* numa só ISR. Para saber a origem da interrupção, é necessário realizar a leitura do vetor de decodificação de interrupção (TAxIV).

```
#define TA0_CCRN_INT 52          // ISR das interrupções dos canais 1, 2, 3, 4 e
...                              // overflow
#pragma vector=TA0_CCRN_INT
__interrupt void P1ISR() {       //
    switch (TA0IV) {             // A leitura de TA0IV limpa a flag correspondente
        case 0x0: break;         // Não houve interrupção
        case 0x2: break;         // TA0.1 (maior prioridade)
        case 0x4:                // TA0.2
            P1OUT ^=  BIT0;      //
            break;
        ...                      // ...
        case 0xE: break;         // Overflow (menor prioridade)
        default:  break;
    }
}
```

Note a presença de um switch-case estruturado ao redor do registro TA0IV (TA0 Interrupt Vector). Este registro retorna um número par que indica a interrupção de maior prioridade. Consulte o capítulo do Timer A do User's Guide para saber qual número corresponde à qual canal e porque o vetor de interrupções sempre retorna um número par.

Exercícios:

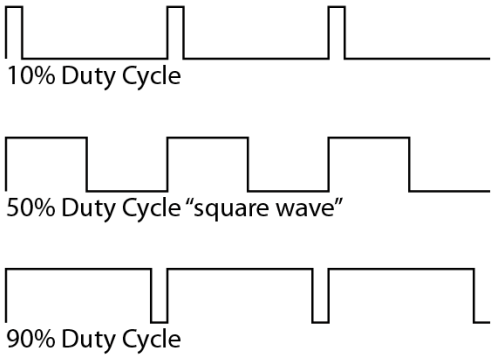
Exercício 10: Interrupção dedicadas
Repita o exercício 9 usando a interrupção do comparador CCR0.

Exercício 11: Definindo um tick mínimo
Usando as interrupções do timer A0, faça o LED vermelho piscar em 1Hz e o LED verde piscar duas vezes mais rápido, ou seja, em 2Hz.

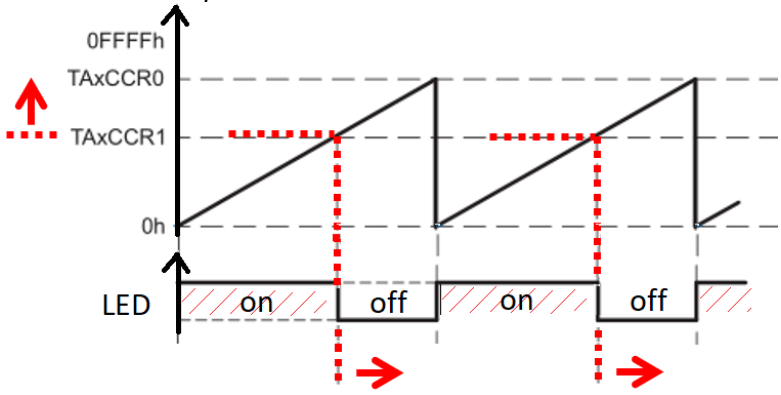
Exercício 12: Várias instâncias de timers
Use instâncias diferentes de timers para fazer o LED vermelhor piscar em 2Hz e o verde em 5Hz.

Pulse Width Modulation (PWM)

Modulação por largura de pulso é uma técnica bastante utilizada quando queremos controlar a energia transmitida entre dispositivos. Essa técnica é usada para controlar a velocidade de motores DC, luminosidade de LEDs, ou até regular níveis de tensão em controladores de carga. A técnica consiste em enviar pulsos de largura controlável num intervalo de tempo regular. A relação entre a largura do pulso e o período é chamada de ciclo de carga, ou *duty cycle* em inglês. Quanto maior for o *duty cycle*, maior será a energia média do sinal.



O olho humano não consegue perceber variações de luminosidade muito rápidas. Em média, uma população de indivíduos consegue enxergar variações de até 20 a 30Hz. Podemos utilizar essa "limitação" do olho humano para controlar a luminosidade de um LED.

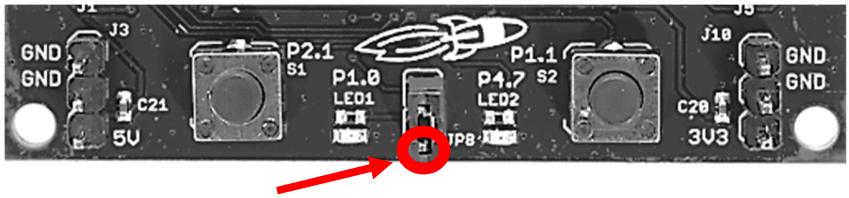


Exercícios:

Exercício 13: PWM por software com *duty cycle* fixo
Usando as interrupções do timer, faça o LED vermelho piscar em 50Hz com *duty cycle* de 50%. É recomendado o uso das interrupções de overflow e CCR1.

Exercício 14: PWM por software com *duty cycle* variável
Incremente a solução do exercício 13 adicionando o controle do duty cycle através da amostragem dos botões na rotina principal: main(). O botão da direita aumenta o duty cycle e o botão da esquerda diminui em passos de 10% de CCR0.

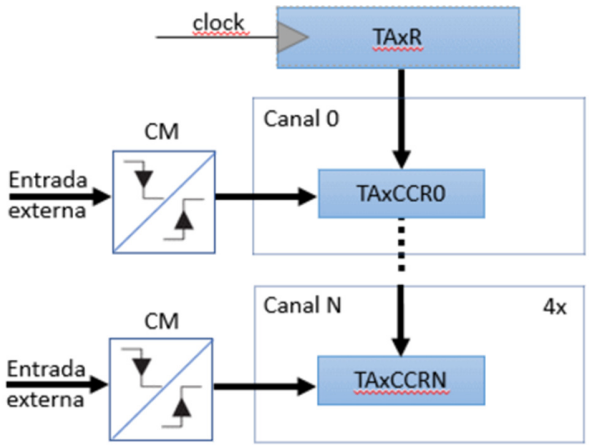
Exercício 15: PWM por hardware
Repita o programa 13 usando a saída do timer. Procure no datasheet qual pino está conectado à saída do canal desejado. Ligue a saída do timer no LED vermelho com um cabo removendo o jumper JP8 e conectando a saída do timer no pino de baixo do jumper (pino mais próximo da extremidade da placa). **Não conecte no outro pino! Você irá queimar a porta do seu MSP.**



Exercício 16: PWM por hardware com duty cycle variável
Repita o programa 15, agora usando os botões S1 e S2 para aumentar e diminuir o *duty cycle* em passos de 10% de CCR0.

Timer A: Modo de Captura

No modo de captura, os registros CCR funcionam como variáveis para guardar o valor do contador quando um evento externo acontece. Esse evento pode ser devido a um flanco de subida, descida ou ambos, dependendo do modo de captura (CM). Esse modo é útil para medir tempo entre eventos externos ao microcontrolador.



Exercícios:

Exercício 17: Captura de um evento de hardware
Use o timer em modo de captura para medir o tempo entre o acionamento dos botões S1 e S2. Ou seja, quando o usuário pressionar o botão S1 o timer inicia. Quando pressionar o botão S2 o timer captura o tempo que passou. Se for menor que 1 segundo, acende o LED vermelho, se estiver entre 1 e 3 segundos, acende os dois LEDs, se for maior que 3 segundos, acende apenas o LED verde.

Exercício 18: Medir o intervalo entre os rebotes de uma chave
Use o timer em modo de captura de ambos os flancos para medir os intervalos entre os diversos rebotes que surgem quando a chave S1 é acionada. O programa deve armazenar os intervalos entre os rebotes em um vetor de nome “rebotes” e trabalhar com precisão de microssegundos. Para limitar o tempo de captura, faça a medição apenas durante uma janela de 1 segundo que começa a ser contada após o acionamento da chave S1. O programa termina após essa janela de tempo e o programador pode então consultar o vetor “rebotes” com o CCS.

Exercício 19: Captura por software.
Meça o tempo de execução das duas linhas de código abaixo:

```
volatile double hardVar = 128.43984610923f;
hardVar = (sqrt(hardVar * 3.14159265359) + 30.3245)/1020.2331556 - 0.11923;
```

PROBLEMA 2: Utilizando o sensor de Proximidade

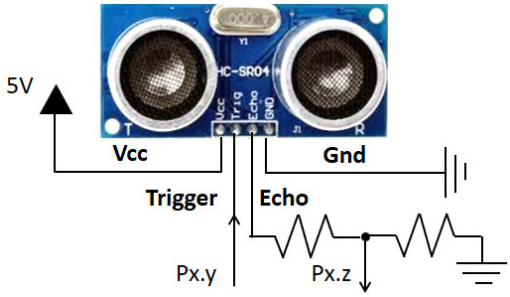
Este problema deve receber o visto (nota), que só será validado após seu upload. Faça o upload de apenas um programa por equipe. O programa solução entregue deve estar completo e pronto para ser "carregado" e executado no Code Composer. Será verificado o correto funcionamento de todo programa. **Caso o programa solução entregue não funcione, a nota será zerada**.

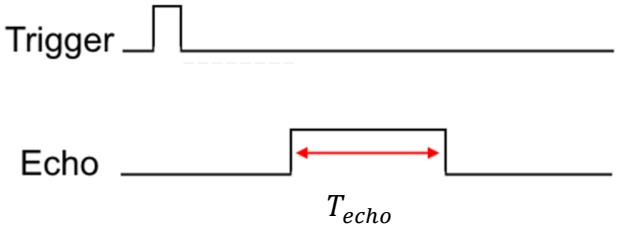
ÉTICA E HONESTIDADE ESTUDANTIL:
Será verificada a similaridade entre os programas entregues e os demais programas, incluindo os dos semestres anteriores. Caso a similaridade entre dois programas seja grande o suficiente para caracterizar a "cola", as equipes estão **automaticamente reprovadas**. Oportunamente serão especificadas as datas limite para o visto e para o upload da solução.

OBJETIVO:
Implementar uma "trena" digital utilizando o sensor de proximidade e o módulo HC-SR04.

DADOS:
O sensor de proximidade HC-SR04 é equipado de um alto-falante e um microfone ultrassônicos. Quando acionado por um pulso positivo na entrada *trigger* o sensor envia pulsos sonoros ultrassônicos inaudíveis ao ouvido humano. Uma resposta do tempo de propagação é devolvida no sinal *echo*. A duração do sinal *echo* corresponde ao tempo de voo do som no ar. O sinal *trigger* deve ter duração mínima de 10us. O sinal *echo* irá retornar um pulso com duração máxima de 12ms (qual é a maior distância que podemos medir com esse dispositivo?).

Atenção, o sensor é alimentado com 5V. Use então um **divisor resistivo no retorno do echo** para não queimar o pino de entrada da sua launchpad.





Pedido (programa para receber visto):

Escreva uma aplicação embarcada que meça, a cada 20ms, a distância reportada pelo sensor HC-SR04. Se a distância medida for menor que 20cm o LED vermelho deve acender, se estiver entre 20 e 40cm, o LED verde deve acender e, se estiver acima de 40 cm, ambos os LEDs devem acender.

Desafio opcional: Usando o recurso do "break point" do CCS, mostre a distância em tempo real.