

MSP430|Periférico ADC

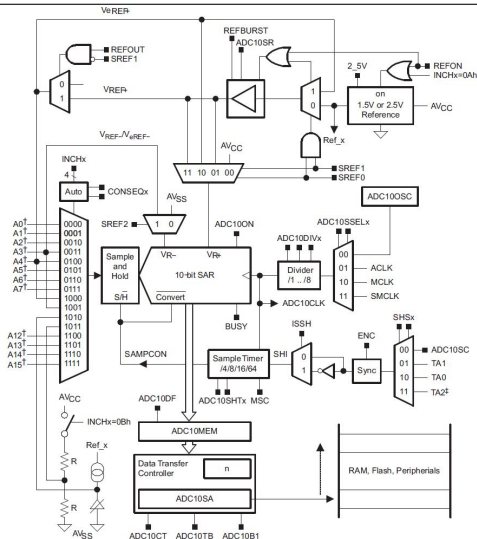
Luiz Fernando Pinto de Oliveira

23 de julho de 2018

■ Características:

- ▶ Taxa de conversão máxima superior a 200 ksp/s;
- ▶ Conversor de 10-bit monótona sem códigos faltantes;
- ▶ *Sample-and-hold* com períodos de amostra programáveis;
- ▶ Inicialização da conversão por software ou Timer_A;
- ▶ Geração de tensão de referência no chip selecionável por software (1,5 V ou 2,5 V);
- ▶ Referência interna ou externa selecionável por software;
- ▶ Até oito canais de entrada externos (doze em dispositivos MSP430F22xx);
- ▶ Canais de conversão para sensor de temperatura interna, V_{CC} e referências externas;
- ▶ Fonte de relógio de conversão selecionável;
- ▶ Modos de conversão de simples, contínua, sequencial e sequencial contínua;
- ▶ O núcleo do ADC e a tensão de referência podem ser desligados separadamente;
- ▶ Controlador de transferência de dados para armazenamento automático de resultados de conversão.

ADC - Diagrama de blocos do ADC



- O núcleo ADC converte uma entrada analógica em sua representação digital de 10 bits e armazena o resultado no registro ADC10MEM. O núcleo usa dois níveis de tensão programáveis / selecionáveis (V_{R+} e V_{R-}) para definir os limites superior e inferior da conversão.
- A saída digital (N_{ADC}) atinge sua escala completa (03FFh) quando o sinal de entrada é igual ou maior que V_{R+} e zero quando o sinal de entrada é igual ou menor que V_{R-} .
- O canal de entrada e os níveis de tensão de referência (V_{R+} e V_{R-}) são definidos na memória de controle de conversão.
- Os resultados da conversão podem estar em formato binário direto ou em formato de complemento 2. A fórmula de conversão para o resultado do ADC ao usar o formato binário direto é:

$$N_{ADC} = 1023 * \frac{V_{IN} - V_{R-}}{V_{R+} - V_{R-}}$$

- O núcleo do ADC10 é configurado por dois registros de controle, ADC10CTL0 e ADC10CTL1. O núcleo é ativado com o bit ADC10ON. Com poucas exceções, os bits de controle ADC10 só podem ser modificados quando ENC = 0. O ENC deve ser definido como 1 antes que qualquer conversão possa ocorrer.

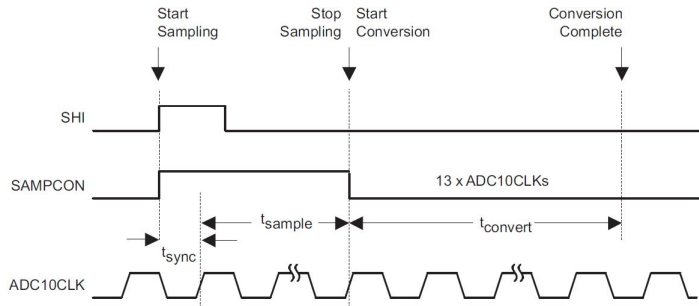
- O ADC10CLK é usado como o relógio de conversão e para gerar o período de amostragem. O *clock* de origem ADC10 é selecionado usando os bits ADC10SSELx e pode ser dividido de 1 a 8 usando os bits ADC10DIVx. Possíveis fontes ADC10CLK são SMCLK, MCLK, ACLK e oscilador interno ADC10OSC.
- O ADC10OSC, gerado internamente, está na faixa de 5 MHz, mas varia com dispositivos individuais, tensão de alimentação e temperatura. Consulte a folha de dados específica do dispositivo para a especificação ADC10OSC.

- As entradas externas ADC10 A_x , V_{eREF+} e V_{REF-} compartilham terminais com portas de E / S para fins gerais, que são portas digitais CMOS (consulte a folha de dados específica do dispositivo).
- Quando sinais analógicos são aplicados a portas digitais CMOS, a corrente parasita pode fluir de VCC para GND. Essa corrente parasita ocorre se a tensão de entrada estiver próxima do nível de transição do gate. Desativar o buffer do pino de porta elimina o fluxo de corrente parasita e, portanto, reduz o consumo geral de corrente. Os bits ADC10AEx fornecem a capacidade de desativar os buffers de entrada e saída dos pinos da porta.

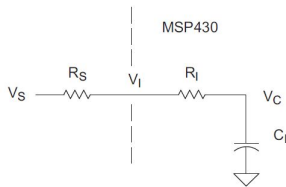
- O módulo ADC10 contém uma referência de tensão interna com dois níveis de tensão selecionáveis. Definir $REFON = 1$ ativa a referência interna. Quando $REF2_5V = 1$, a referência interna é de 2,5 V. Quando $REF2_5V = 0$, a referência é de 1,5 V.
- A tensão de referência interna pode ser usada internamente ($REFOUT = 0$) e, quando $REFOUT = 1$, externamente no pino V_{REF+} . $REFOUT = 1$ só deve ser usado se os pinos V_{REF+} e V_{REF-} estiverem disponíveis como pinos de dispositivo.
- Referências externas podem ser fornecidas para os pinos A4 e A3, V_{R+} e V_{R-} , respectivamente. Quando referências externas são usadas, ou quando VCC é usado como referência, a referência interna pode ser desligada para economizar energia.
- Uma referência positiva externa V_{REF+} pode ser *buffered* configurando $SREF0 = 1$ e $SREF1 = 1$ (somente dispositivos com V_{REF+} pino). Isso permite usar uma referência externa com uma grande resistência interna ao custo da corrente do *buffer*. Quando $REFBURST = 1$, o consumo atual aumentado é limitado ao período de amostragem e conversão.

- Uma conversão analógico-digital é iniciada com uma borda de subida do sinal de entrada de amostra SHI. A fonte para SHI é selecionada com os bits SHSx e inclui o seguinte:
 - ▶ O ADC10SC bit;
 - ▶ O Timer_A Output Unit 1;
 - ▶ O Timer_A Output Unit 0;
 - ▶ O Timer_A Output Unit 2.
- A polaridade da fonte do sinal SHI pode ser invertida com o bit ISSH. Os bits SHTx selecionam o período de amostragem para ser 4, 8, 16 ou 64 ciclos ADC10CLK.

- O tempo de amostragem define o valor SAMPCON alto para o período de amostra selecionado após a sincronização com ADC10CLK. O tempo total de amostragem é t_{sample} mais t_{sync} . A transição de alto para baixo do SAMPCON inicia a conversão de analógico para digital, que requer 13 ciclos de ADC10CLK, conforme mostrado abaixo:



- Quando $\text{SAMPCON} = 0$, todas as entradas A_x são de alta impedância. Quando $\text{SAMPCON} = 1$, a entrada A_x selecionada pode ser modelada como um filtro passa-baixo RC durante o período amostral, como mostrado na figura abaixo.
- Uma resistência de entrada interna MUX-on R_I ($2\text{ k}\Omega$ no máximo) em série com o capacitor C_I (27 pF no máximo) é vista pela fonte. A tensão do C_I do capacitor V_C deve ser carregada dentro de $1/2$ LSB da tensão da fonte V_S para uma conversão precisa de 10 bits.



V_I = Input voltage at pin A_x
 V_S = External source voltage
 R_S = External source resistance
 R_I = Internal MUX-on input resistance
 C_I = Input capacitance
 V_C = Capacitance-charging voltage

- A resistência da fonte R_S e R_I afeta o t_{sample} . As equações a seguir podem ser usadas para calcular o tempo mínimo de amostragem para uma conversão de 10 bits.

$$t_{sample} > (R_S + R_I) * \ln(2^{11}) * C_I$$

- Substituindo os valores para R_I e C_I fornecidos acima, a equação se torna:

$$t_{sample} > (R_S + 2k\Omega) * 7,625 * 27pF$$

- Por exemplo, se R_S for $10\text{ k}\Omega$, o período de amostragem deve ser maior que $2,47\text{ }\mu\text{s}$.

- Quando o *buffer* de referência é usado no modo burst, o tempo de amostragem deve ser maior que o tempo de amostragem calculado e o tempo de estabilização do *buffer*, $t_{REFBURST}$:

$$t_{sample} > \begin{cases} (R_S + R_I) * \ln(2^{11}) * C_I \\ t_{REFBURST} \end{cases}$$

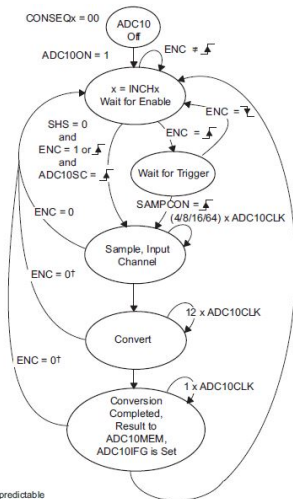
- Por exemplo, se V_{Ref} for 1,5 V e R_S for 10 k Ω , o período de amostragem deve ser maior que 2,47 μs quando $ADC10SR = 0$, ou 2,5 μs quando $ADC10SR = 1$. Consulte a folha de dados específica do dispositivo para os parâmetros.
- Para calcular o tempo de acomodação do *buffer* ao usar uma referência externa, a fórmula é:

$$t_{REFBURST} = S_R * V_{Ref} - 0,5 \mu s$$

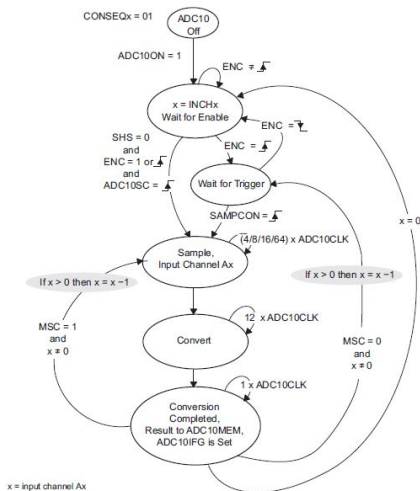
- Onde:
 - ▶ S_R = Slew rate buffer (1 $\mu s/V$ quando $ADC10SR = 0$ e 2 $\mu s/V$ quando $ADC10SR = 1$);
 - ▶ V_{Ref} = Tensão de referência externa.

ADC - Modo de conversão simples de canal único

- Um único canal selecionado pelo INCHx é amostrado e convertido uma vez. O resultado do ADC é gravado em ADC10MEM.
- Quando o ADC10SC aciona uma conversão, as conversões sucessivas podem ser acionadas pelo bit ADC10SC. Quando qualquer outra fonte de *trigger* é usada, o ENC deve ser alternado entre cada conversão.

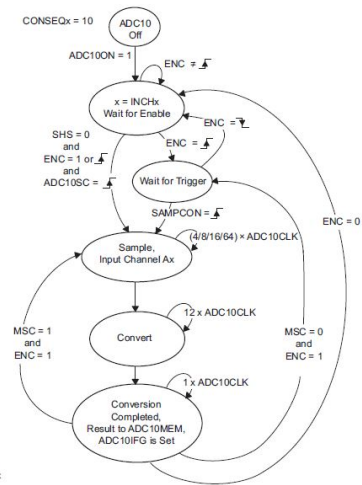


- Uma sequência de canais é amostrada e convertida uma vez. A sequência começa com o canal selecionado por INCHx e decrementa para o canal A0. Cada resultado do ADC é gravado em ADC10MEM. A sequência pára após a conversão do canal A0.
- Quando o ADC10SC aciona uma sequência, sequências sucessivas podem ser acionadas pelo bit ADC10SC. Quando qualquer outra fonte de *trigger* é usada, o ENC deve ser alternado entre cada sequência.

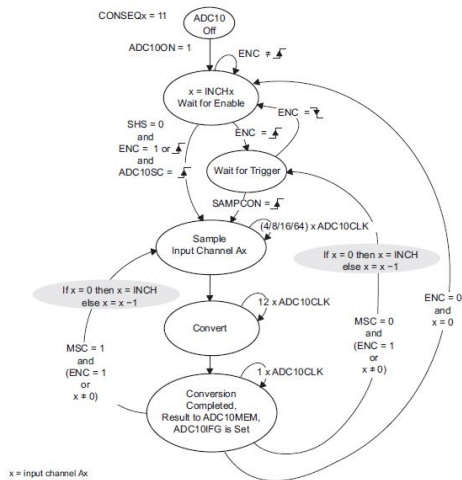


ADC - Modo de conversão contínua de canal único

- Um único canal selecionado pelo INCHx é amostrado e convertido continuamente. Cada resultado do ADC é gravado em ADC10MEM.



- Uma sequência de canais é amostrada e convertida repetidamente. A sequência começa com o canal selecionado por INCHx e decrementa para o canal A0.
- Cada resultado do ADC é gravado em ADC10MEM. A sequência termina após a conversão do canal A0 e o próximo sinal de disparo reinicia a sequência.



ADC - ADC10CTL0, Registrador de controle 0

ADC10CTL0							
15	14	13	12	11	10	9	8
SREFx			ADC10SHTx		ADC10SR	REFOUT	REFBURST
7	6	5	4	3	2	1	0
MSC	REF2_5V	REFON	ADC10ON	ADC10IE	ADC10IFG	ENC	ADC10SC

■ SREFx: Seleção da referência.

- ▶ 000 $V_{R+} = VCC$ e $V_{R-} = VSS$;
- ▶ 001 $V_{R+} = V_{REF+}$ e $V_{R-} = VSS$;
- ▶ 010 $V_{R+} = V_{eREF+}$ e $V_{R-} = VSS$. Somente dispositivos com V_{eREF+} ;
- ▶ 011 $V_{R+} = \text{Buffered } V_{eREF+}$ e $V_{R-} = VSS$. Somente dispositivos com V_{eREF+} ;
- ▶ 100 $V_{R+} = VCC$ e $V_{R-} = V_{REF-} / V_{eREF-}$. Somente dispositivos com V_{eREF-} ;
- ▶ 101 $V_{R+} = V_{REF+}$ e $V_{R-} = V_{REF-} / V_{eREF-}$. Somente dispositivos com V_{eREF-} ;
- ▶ 110 $V_{R+} = V_{eREF+}$ e $V_{R-} = V_{REF-} / V_{eREF-}$. Somente dispositivos com $V_{eREF+/-}$;
- ▶ 111 $V_{R+} = \text{Buffered } V_{eREF+}$ e $V_{R-} = V_{REF-} / V_{eREF-}$. Somente dispositivos com $V_{eREF+/-}$.

ADC - ADC10CTL0, Registrador de controle 0

ADC10CTL0							
15	14	13	12	11	10	9	8
SREFx			ADC10SHTx		ADC10SR	REFOUT	REFBURST
7	6	5	4	3	2	1	0
MSC	REF2_5V	REFON	ADC10ON	ADC10IE	ADC10IFG	ENC	ADC10SC

- **ADC10SHTx**: Período de *sample-and-hold* do ADC10:
 - ▶ 00 4 × ADC10CLKs;
 - ▶ 01 8 × ADC10CLK;
 - ▶ 10 16 × ADC10CLKs;
 - ▶ 11 64 × ADC10CLKs.
- **ADC10SR**: Taxa de amostragem do ADC10. Esse bit seleciona o recurso da unidade de buffer de referência para a taxa máxima de amostragem. A configuração de ADC10SR reduz o consumo atual do buffer de referência.
 - ▶ 0 *buffer* de referência suporta até 200 ksps;
 - ▶ 1 *buffer* de referência suporta até 50 ksps.
- **REFOUT**: Referência de saída.
 - ▶ 0 desligado;
 - ▶ 1 ligado.
- **REFBURST**: Referência burst.
 - ▶ 0 *buffer* de referência contínua;
 - ▶ 1 *buffer* de referência somente durante a conversão de amostra e conversão.
- **MSC**: Amostra múltipla e conversão. Válido apenas para modos de sequência ou repetidos.
 - ▶ 0 A amostragem requer uma borda de subida do sinal SHI para acionar cada conversão e amostra.
 - ▶ 1 A primeira borda de subida do sinal SHI aciona o temporizador de amostragem, mas outras amostragens e conversões são realizadas automaticamente assim que a conversão anterior é concluída.

ADC - ADC10CTL0, Registrador de controle 0

ADC10CTL0							
15	14	13	12	11	10	9	8
SREFx			ADC10SHTx		ADC10SR	REFOUT	REFBURST
7	6	5	4	3	2	1	0
MSC	REF2_5V	REFON	ADC10ON	ADC10IE	ADC10IFG	ENC	ADC10SC

- **REF2_5V:** Tensão do gerador de referência. REFON também deve ser definido.
 - ▶ 0 1.5 V;
 - ▶ 1 2,5 V.
- **REFON:** Gerador de referência ativado.
 - ▶ 0 referência desativada;
 - ▶ 1 referência ativada.
- **ADC10ON:** Ativa o ADC10.
 - ▶ 0 ADC10 desativado;
 - ▶ 1 ADC10 ativado.
- **ADC10IE:** Ativa a interrupção do ADC10.
 - ▶ 0 interrupção desativada;
 - ▶ 1 interrupção ativada.

ADC - ADC10CTL0, Registrador de controle 0

ADC10CTL0							
15	14	13	12	11	10	9	8
SREFx			ADC10SHTx		ADC10SR	REFOUT	REFBURST
7	6	5	4	3	2	1	0
MSC	REF2_5V	REFON	ADC10ON	ADC10IE	ADC10IFG	ENC	ADC10SC

- **ADC10IFG:** *Flag* da interrupção do ADC10. Este bit é definido se o ADC10MEM for carregado com um resultado de conversão. Ele é redefinido automaticamente quando a solicitação de interrupção é aceita ou pode ser redefinida pelo *software*.
 - ▶ 0 Nenhuma interrupção pendente;
 - ▶ 1 Interrupção pendente.
- **ENC:** Ativa a conversão.
 - ▶ 0 ADC10 desativado;
 - ▶ 1 ADC10 ativado.
- **ADC10SC:** Inicializa a conversão. Início de amostra e conversão controlado por *software*. ADC10SC e ENC podem ser definidos em conjunto com uma instrução. O ADC10SC é redefinido automaticamente.
 - ▶ 0 sem início de amostragem e conversão;
 - ▶ 1 inicializa a amostragem e conversão.

ADC - ADC10CTL1, Registrador de controle 1

ADC10CTL1							
15	14	13	12	11	10	9	8
INCHx				SHSx		ADC10DF	ISSH
7	6	5	4	3	2	1	0
ADC10DIVx			ADC10SSELx		CONSEQx		ADC10BUSY

■ **INCHx:** Seleção de canal de entrada. Esses bits selecionam o canal para uma conversão única ou o canal mais alto para uma sequência de conversões.

- ▶ 0000 A0;
- ▶ 0001 A1;
- ▶ 0010 A2;
- ▶ 0011 A3;
- ▶ 0100 A4;
- ▶ 0101 A5;
- ▶ 0110 A6;
- ▶ 0111 A7;
- ▶ 1000 V_{eREF+} ;
- ▶ 1001 V_{REF-} / V_{eREF-} ;
- ▶ 1010 sensor de temperatura;
- ▶ 1011 $(VCC - VSS) / 2$;
- ▶ 1100 $(VCC - VSS) / 2$, A12 em dispositivos MSP430F22xx;
- ▶ 1101 $(VCC - VSS) / 2$, A13 nos dispositivos MSP430F22xx;
- ▶ 1110 $(VCC - VSS) / 2$, A14 nos dispositivos MSP430F22xx;
- ▶ 1111 $(VCC - VSS) / 2$, A15 nos dispositivos MSP430F22xx.

ADC - ADC10CTL1, Registrador de controle 1

ADC10CTL1							
15	14	13	12	11	10	9	8
INCHx				SHSx		ADC10DF	ISSH
7	6	5	4	3	2	1	0
ADC10DIVx			ADC10SSELx		CONSEQx		ADC10BUSY

- **SHSx:** Seleciona a fonte de *sample-and-hold*:
 - ▶ 00 bit ADC10SC;
 - ▶ 01 Timer_A.OUT1;
 - ▶ 10 Timer_A.OUT0;
 - ▶ 11 Timer_A.OUT2 (Timer_A.OUT1 nos dispositivos MSP430F20x0, MSP430G2x31 e MSP430G2x30).
- **ADC10DF:** Formato dos dados.
 - ▶ 0 binário;
 - ▶ 1 complemento 2s.
- **ISSH:** Inversão do sinal *sample-and-hold*.
 - ▶ 0 o sinal da amostra da entrada não é invertido;
 - ▶ 1 o sinal da amostra da entrada é invertido.
- **ADC10DIVx:** Divisor do *clock* ADC10.
 - ▶ 000 /1;
 - ▶ 001 /2;
 - ▶ 010 /3;
 - ▶ 011 /4;
 - ▶ 100 /5;
 - ▶ 101 /6;
 - ▶ 110 /7;
 - ▶ 111 /8.

ADC - ADC10CTL1, Registrador de controle 1

ADC10CTL1							
15	14	13	12	11	10	9	8
INCHx				SHSx		ADC10DF	ISSH
7	6	5	4	3	2	1	0
ADC10DIVx			ADC10SSELx		CONSEQx		ADC10BUSY

- **ADC10SSELx:** Seleciona a fonte de *clock* do ADC10.
 - ▶ 00 ADC10OSC;
 - ▶ 01 ACLK;
 - ▶ 10 MCLK;
 - ▶ 11 SMCLK.
- **CONSEQx:** Seleciona o modo de conversão sequencial.
 - ▶ 00 conversão simples de canal único;
 - ▶ 01 conversão sequencial de canais;
 - ▶ 10 conversão contínua de canal único;
 - ▶ 11 conversão contínua sequencial de canais.
- **ADC10BUSY:** ADC10 ocupado. Este bit indica uma amostra ativa ou operação de conversão
 - ▶ 0 nenhuma operação está ativa;
 - ▶ 1 uma sequência, amostra ou conversão está ativa.

ADC - Exemplo do ADC em modo de conv. simples

```
#include <msp430.h>
// Segundo a Texas, essas linhas sao para ajustar uma pequena inconsistencia
// que pode ocorrer entre os microcontroladores g2553 e g2231
#ifndef TIMER0_A1_VECTOR
#define TIMER0_A1_VECTOR TIMERA1_VECTOR
#define TIMER0_A0_VECTOR TIMERA0_VECTOR
#endif

volatile long temperatura;
int main(void)
{
    WDTCTL = WDTPW | WDTHOLD;           // stop watchdog timer
    P1DIR = 0x41;
    P1OUT = 0;

    if ((CALBC1_1MHZ == 0xFF) || (CALDCO_1MHZ == 0xFF)){
        P1OUT = 0x01;
        while(1);
    }
    BCSCTL1 = CALBC1_1MHZ;
    DCOCTL = CALDCO_1MHZ;
    BCSCTL3 |= LFXT1S_2;
    IFG1 &= ~OFIFG;
    BCSCTL2 |= SELM_0 + DIVM_3 + DIVS_3;
```

ADC - Exemplo do ADC em modo de conv. simples

```
while(1){  
    ADC10CTL1 = INCH_0 + ADC10DIV_0;  //INCH_10 = Seleciona canal 10; ADC10DIV_0 = divide o ADC10CLK /1  
    ADC10CTL0 = SREF_1 + ADC10SHT_3 + REFON + ADC10ON;  //SREF_1 = Seleciona referencia Vref e Vss;  
    ADC10SHT_3 = Amostra e mantem por 64 x ADC10CLK; REFON = Habilita o gerador de referencia;  
    ADC10ON = Habilita o ADC10  
    _delay_cycles(5);  
    ADC10CTL0 |= ENC + ADC10SC;  //ENC = Habilita a conversao; ADC10SC = Inicia a conversao  
    P1OUT = 0x40;  
    _delay_cycles(100);  
    ADC10CTL0 &= ~ENC;  
    ADC10CTL0 &= ~(REFON + ADC10ON);  
    temperatura = ADC10MEM;  //ADC10MEM = Efeuta a leitura na memoria  
    P1OUT = 0;  
    _delay_cycles(125000);  
}
```

- MSP403x2xx *Family, User's Guide, revised July 1013;*
- Getting Started with the MSP430 LaunchPad, *Student Guide and Lab Manual, revision 2.01 February 2012.*

Seja 100 % Motivado!