

OSCILADORES A CRISTAL

COM PORTAS CMOS

Por Luiz Amaral
PY1LL / AC2BR

Introdução

Portas lógicas como inversores ou circuitos AND e OR na tecnologia TTL há muito são utilizados para se construir osciladores de vários tipos incluindo os controlados por cristal. Modernamente são raros os usos nesta tecnologia por ser considerada obsoleta, mas os circuitos CMOS de vários tipos como as séries CD, HC e AC entre outras, que já apresentam grande velocidade de comutação ou tempos de propagação muito curtos têm se prestado para tal fim desde frequências muito baixas até várias dezenas de megahertz¹.

Lembremos aqui que todo cristal apresenta duas frequência de ressonância, a chamada série e a chamada paralelo. O oscilador deve ser convenientemente escolhido se se deseja que oscile numa ou noutra frequência de ressonância do cristal.

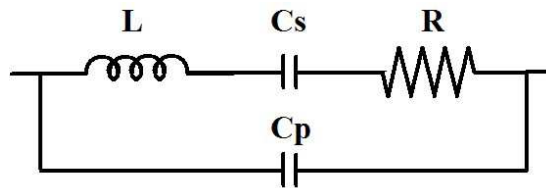


Figura 1

32kHz Fundamental	Parâmetro	200kHz Fundamental	2MHz Fundamental	30MHz Sobretom
200kΩ	R	2kΩ	100Ω	20Ω
7.000H	L	27H	529mH	11mH
0,003pF	Cs	0,024pF	0,012pF	0,0026pF
1,7pF	Cp	9pF	4pF	6pF
100.000	Q	18.000	54.000	100.000

TABELA 1

Um cristal tem, como circuito equivalente em frequência próxima das ressonâncias, o diagrama mostrado na Figura 1. **L** é chamada de indutância mocional, **Cs** a capacitância mocional, **R** a resistência equivalente de perdas e **Cp** a capacitância paralela, esta normalmente determinada pelos eletrodos e pinos externos. A indutância e a capacitância mocionais, diferentemente de **Cp**, não são elementos físicos do cristal, mas seus equivalentes elétricos de armazenamento de energia (que fisicamente se armazena na rede cristalina). De um modo geral **L** tem valor relativamente elevado e **Cs** relativamente

¹ Ver Referências 1 e 2

pequeno. A Tabela 1 mostra valores típicos desses valores. Note-se que, em especial, o **Q** do ressonador a cristal é bastante elevado (há casos de cristais especiais de envólucro de vidro e no entorno de 5MHz com **Q** da ordem de **5.000.000**).

A frequência de ressonância série independe de **C_p** e é dada por:

$$F_s = 1/[2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C_s}]$$

Por outro lado a frequência de ressonância paralela depende de ambas capacitâncias e é dada por:

$$F_p = F_s \cdot [1 + C_s / (2 \cdot C_p)]$$

F_p é sempre maior que **F_s**. Pode-se observar que a dependência da frequência paralela em **C_p** permite que esta frequência seja ajustável (pelo menos dentro de certo limite), pela variação da capacitância total em paralelo com o cristal **C_p+C_L** onde **C_L** é a capacitância de carga externa ao cristal.

Os cristais apresentam oscilações mecânicas que se manifestam eletricamente através de sua piezoelectricidade. Eles podem oscilar na frequência mais baixa chamada de fundamental e em outras mais altas chamadas de sobretons. Estas são outras frequências de ressonância mecânica dos mesmos e são sempre de numeração ímpar (3º sobreton, 5º sobreton, etc). Os sobretons **NÃO** são harmônicos da fundamental (dependem de propriedades mecânicas dos cristais), apesar de se aproximarem bastante deles, sendo que a diferença entre eles é da ordem do áudio. Cristais não oscilam em harmônicos. Como há limite físico (de fabricação) dos cristais de fundamental, usá-los em sobreton é uma solução bastante prática. Os cristais de sobreton têm formato especial dos seus eletrodos para dificultar a oscilação na fundamental que é de frequência mais baixa e tem maior facilidade de oscilar nos osciladores simples. Os circuitos também têm de ser especiais para que oscilem nos sobretons.

Teoricamente um oscilador qualquer, no que diz respeito à oscilação, pode ser linear. Mas neste caso a amplitude não pára de crescer e acaba por atingir uma limitação qualquer do próprio circuito, o que o transforma num tipo não linear. Mas a maneira mais simples de se fazer um oscilador começar o processo, é usar (pelo menos inicialmente) um amplificador linear (ou pelo menos que opere com pequenos sinais, mesmo não sendo linear). Desta forma, mesmo as portas lógicas, que a princípio operam em apenas dois valores de tensão (alto e baixo), devem ser convenientemente 'linearizadas', além, claro, de que se satisfaçam as condições de oscilação, ou sejam, ganho de potência maior que **1** e fase total do 'loop' igual a **360°**. Para se facilitar a obtenção desta defasagem, usam-se portas inversoras que já garantem **180°**, deixando para a parte ressonante os restantes **180°**.

Como um 'alto' na entrada produz um 'baixo' na saída da porta inversora, uma simples realimentação DC da entrada para a saída vai linearizar a porta, pois a mesma ficará estabilizada exatamente na metade da excursão entre os valores 'alto' e 'baixo'. Não se deve permitir que uma tal porta permaneça nesse estado 'metade' por longo tempo porque, nessa situação, ambos os transistores MOS em série na sua saída estarão conduzindo e a dissipação da porta pode ser excessiva e destruí-la (nos sistemas lógicos, as portas permanecem em 'alto' ou 'baixo' onde apenas um dos transistores de saída está polarizado para a condução com, assim, baixa dissipação).

Os diversos circuitos

Dependendo do tipo de cristal, isto é, de seu corte, de seu tamanho físico, de sua atividade e de sua frequência e modo, vários circuitos diferentes são usados.

A Figura 2 mostra o circuito mais simples e comum usado quando se deseja a oscilação na frequência paralela do cristal. Ele é, na verdade, um oscilador Pierce adaptado à porta inversora.

Neste circuito, **C1** e **C2** em série constituem a capacidade de carga C_L do cristal cujo valor é fornecido pelo fabricante do mesmo. Normalmente eles são iguais e portanto cada um deles é o dobro da capacidade de carga. **CI1** é a própria porta inversora.

A resistência **R1**, como a impedância de entrada da porta é muito alta, deve ser a maior possível e deve ser maior que **10M Ω** , sendo que **15M Ω** e **18M Ω** . **NÃO** tente utilizar resistências menores que **10M Ω** em osciladores com cristais miniatura de baixa frequência, como os de **32,768kHz** usados em relógios digitais, pois normalmente eles não oscilarão. Resistências de **1M Ω** podem ser usadas no caso de cristais fisicamente maiores, mesmo que de baixa frequência.

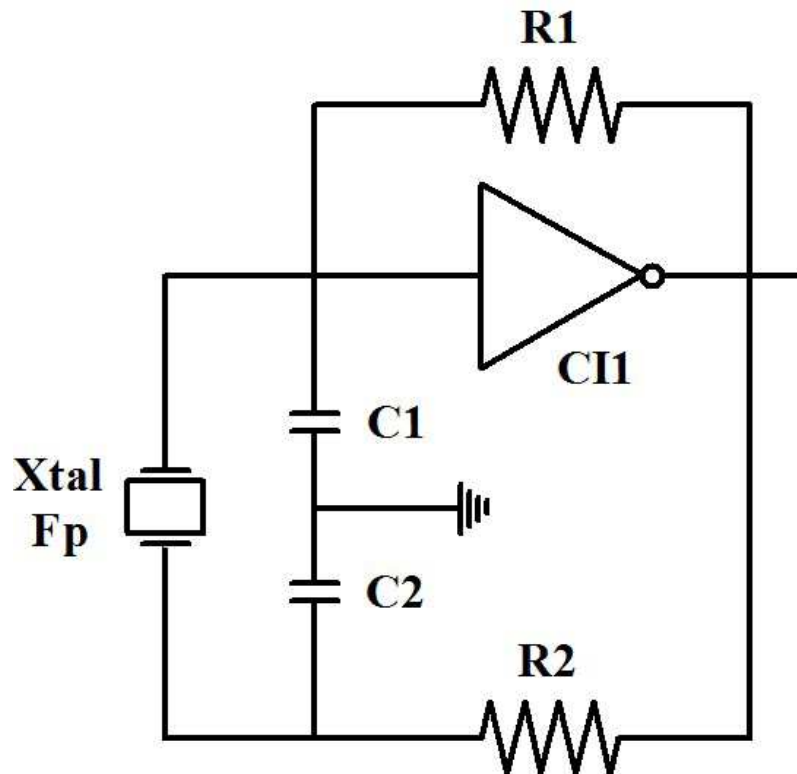


Figura 2

R2 é uma resistência, nem sempre necessária, que limita a realimentação para não se sobre-excitar o cristal. No caso de cristais de tamanho maior, em encapsulamento HC-18, HC-6, HC-33, etc, um valor conveniente já bem testado na prática é de **2,2k Ω** . Este valor é muito pequeno para o caso dos cristais pequenos e de baixa frequência como os de relógio e pode até mesmo destruir o cristal. O valor recomendado, também testado na prática, é de **330k Ω** .

O cristal no caso da Figura 1 deve ser da frequência fundamental e não de sobretom, o que limita, na prática, o uso de cristais de até **20MHz**, que é o limite de frequência dos cristais em fundamental, já que o tamanho da lâmina do mesmo e a estabilidade resultante do oscilador inviabilizam cristais de frequência fundamental mais alta.

Convém aqui discutir um pouco sobre a porta inversora. Ela pode ser um circuito inversor como 1/6 de um CD4069 (hex-inverter) ou um oscilador-divisor do tipo CD4060 para cristais de frequência relativamente baixa de até uns pouco megahertz. Os tempos de propagação desses tipos de portas são

longos demais, introduzindo atrasos excessivos que impedem oscilação estável nas frequências maiores. Para estas, é recomendado o uso de portas mais rápidas como 1/6 do 74HC04 ou o oscilador divisor 74HC4060. As portas das séries 74AC, quando disponíveis, também podem ser usadas e são mais rápidas que as da série 74HC, mas não são necessárias para frequências em fundamental.

Os osciladores internos dos microcontroladores, como a série PIC[®] entre outras, têm muitas versões para os diversos limites de frequência fundamental, mas normalmente são limitados a **20MHz** e já possuem internamente a sua resistência **R1**.

De qualquer forma, deve-se sempre consultar o 'datasheet' do circuito integrado para se ter certeza a respeito dos detalhes.

Mesmo se utilizando portas relativamente rápidas, pode haver outra fonte de limitação da frequência máxima devido à existência do atraso proporcionado pela resistência **R2** (com as capacitâncias envolvidas). Segundo a literatura², a simples substituição de **R2** por um capacitor de mesma reatância (para manter a atenuação do sinal), como na Figura 3, aumenta substancialmente a frequência máxima de oscilação do circuito. O valor desse capacitor deve ter como base a reatância igual a **R2**, porém nunca menor que uns **20pF**.

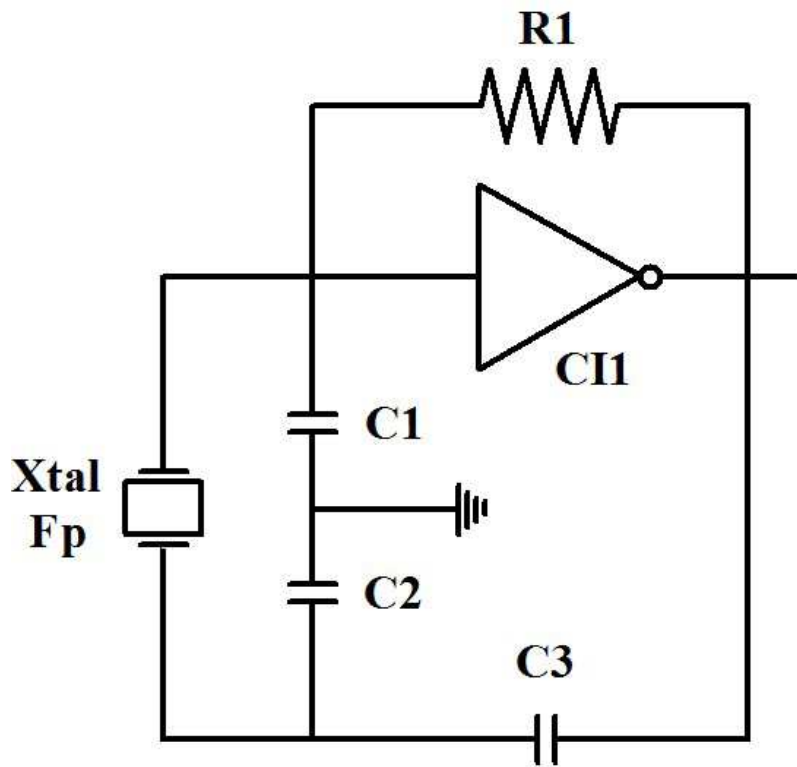


Figura 3

² Ver Referência 3

Para ajuste fino da frequência de oscilação (paralela) do osciladores das figuras 2 e 3, **C1** pode ser um 'trimmer' ou uma associação de capacitor fixo e 'trimmer', chamando a atenção para o valor da capacidade de carga recomendada pelo fabricante para o cristal utilizado. Se esta recomendação não for seguida, a frequência de oscilação não será a nominal do cristal. A Tabela 2 mostra os valores mais comuns para os diversos cristais e seus vários tipos possíveis. Esta tabela funciona bem para o caso dos microprocessadores PIC[®], mas pode ser usada como guia geral para os outros casos. Os valores de **C1** e **C2** variam para cada caso particular e normalmente são ajustados (com 'trimmer') quando se deseja uma frequência mais precisa.

TIPO	FREQ.(kHz)	C1(pF)	C2(pF)
Baixa Potência	32	15 - 30	15 - 30
	200	0 - 15	0 - 15
Frequência média	60 - 200	68 - 150	150 - 200
	150 - 1.000	20 - 50	20 - 50
Frequência alta	2.000 - 20.000	15 - 30	15 - 30

Tabela 2

Outro problema que se apresenta quando se exige frequência mais precisa é o da estabilidade da mesma. Os circuitos simples das figuras 2 e 3 não são convenientes para este caso. A Referência 1 mostra explicitamente o método de diminuir a instabilidade dos osciladores.

Quando se necessita da frequência série do cristal, os circuitos anteriores não funcionam, pois a frequência série corresponde a uma baixa impedância do cristal (a paralela corresponde a uma alta impedância do mesmo). Assim se utiliza dois inversores totalizando os **360°** necessários, como mostrado na Figura 4³ (há casos com apenas uma porta não inversora).

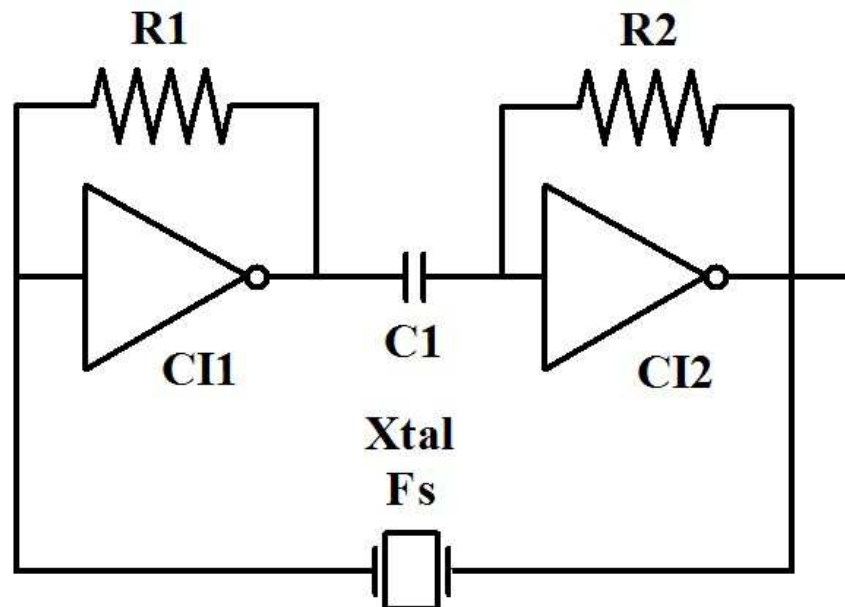


Figura 4

³ Ver Referência 4

Apesar de usar menos componentes externos, é um circuito de uso menos comum por usar duas portas e ter a frequência de oscilação mais dificilmente controlada. Além disso, os circuitos integrados mais complexos, como osciladores-divisores e microcontroladores, possuem seus circuitos adaptados para as ressonâncias paralela e, se necessitam de frequências séries, têm de usar portas externas para sua geração.

Sua 'linearização' tem de ser efetuada de modo separado para as duas portas inversoras. **R1** e **R2** seguem as mesmas restrições do caso paralelo. **C1** é normalmente um capacitor de valor não crítico, mas não deve introduzir atrasos e, assim, não deve apresentar indutância ou resistência série equivalente residuais elevadas nas frequências altas (capacitores tipo 'plate', mica ou SMD multicamada são perfeitos). Seu valor na literatura apresenta uma grande variação, desde **1pF** até mesmo **100nF** ou mais.

Os osciladores de frequência maior que **20MHz** normalmente usam sistemas de ressonância paralela e de sobretom. Os circuitos são mais complexos pela necessidade de ter que se evitar que haja oscilação na frequência fundamental. Muitas vezes a existência desta impede a oscilação no sobretom e em outras vezes ocorre concomitantemente com a do sobretom. Neste último caso, é comum que se ouça um pequeno apito vindo do cristal (especialmente quando estes têm grandes dimensões). Este tom de áudio é o resultado dos batimentos (lembre-se que o oscilador é um circuito não linear e pode, assim, gerar batimentos) entre outros possíveis, da frequência harmônica da fundamental e a do sobretom que são próximas.

A Figura 5 mostra um exemplo deste tipo de circuito de 3° sobretom para o caso de frequência paralela de **31MHz**. O indutor da figura ressona com o capacitor de **50pF** ligeiramente abaixo da frequência do sobretom e, dessa forma, apresenta uma impedância bastante baixa na frequência fundamental impedindo que a oscilação nela ocorra. O capacitor de **22pF** também é escolhido para ajudar a eliminação desta oscilação.

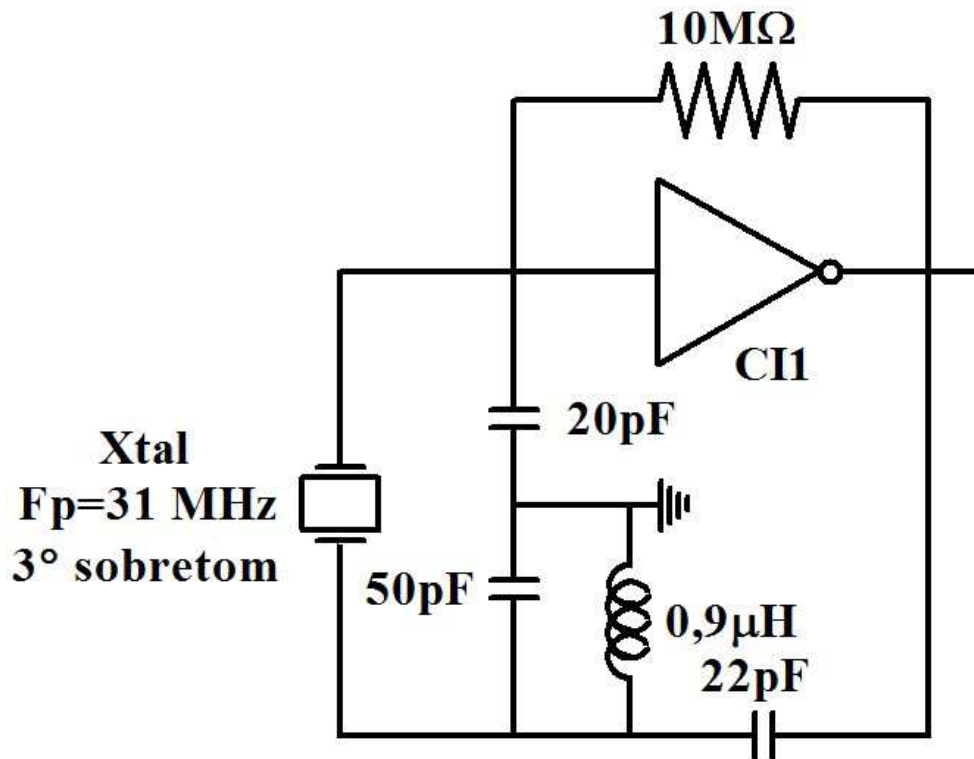


Figura 5

Referências

- 1 - IC CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUITS.pdf, www.rakon.com/resources/Pages/Whitepapers.aspx
- 2 – Designing Crystal Oscillators with Modern CMOS Gates,
www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND8053-D.PDF
- 3 - AN-340.pdf, Fairchild Semiconductor, Application Note 340, May 1983
- 4 - AN-400 A Study Of The Crystal Oscillator For CMOS-COPS, SNOA676, National Semiconductor Application Note 400, August 1986