

Capítulo 5

CONTADORES DE FREQUÊNCIA E TEMPO

Tempo — Não pretendendo discutir o valor absoluto ou relativo relacionado a este parâmetro, gostaria de defini-lo como sendo um dos três eixos referenciais para os atuais processos de medição. Um segundo, unidade de referência amplamente adotada em medidas de tempo, pode ser definida como sendo a duração de 9.192.631.770 ciclos da radiação associada com uma transição do átomo de césio. De todas as unidades de medida, somente o tempo pode ser medido com 9 ou 10 dígitos de precisão, o que faz dos contadores os mais precisos instrumentos de medida disponíveis hoje.

A tecnologia dos circuitos integrados digitais foi a razão de tamanha precisão e desenvolvimento desta área.

A versão mais simples de freqüencímetro tem uma referência de tempo (normalmente um oscilador a cristal) que é dividida 'N' vezes para fornecer um pulso de "gate" bastante preciso. Contadores digitais armazenam quantos pulsos de entrada vêm do ponto que estamos monitorando durante este pulso de *gate* (poderíamos dizer que o *gate* é a unidade de tempo interna do instrumento) e o resultado é então transferido para o *display* digital.

A precisão de um contador pode ser definida como sendo a soma dos seguintes parâmetros:

- ± 1 contagem (fase)
- $\pm$ erros de *delay* (atraso) no pulso de *gate*
- $\pm$ erros devidos à introdução de ruído
- $\pm$ erros da base de tempo interna (estabilidade do oscilador)

Para que possamos comparar a precisão de diferentes contadores, é necessário que compreendamos quais as principais fontes de erro na medição.

As que citei anteriormente são as principais para medidas de tempo e freqüência. Comentaremos sobre outras adiante, mas é importante

obsevar que, por exemplo, erros ocasionados por ruído raramente são mencionados nas especificações de freqüencímetros comuns...

A seguir analisaremos uma a uma as causas de erros em contagens de tempo.

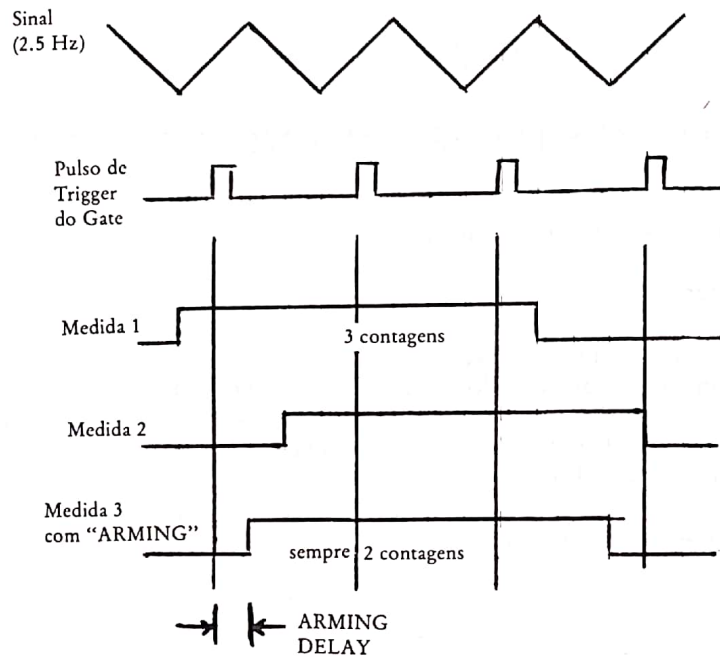


Figura 5.1

Conforme pode-se observar na figura 5.1, durante as medidas 1 e 2 o *gate* de contagem é aberto ao mesmo tempo, porém acumula contagens diferentes devido ao não relacionamento de fase do sinal medido e do oscilador interno do instrumento (a abertura do *gate* independe do sinal de entrada).

Este erro é reduzido em alguns contadores ao se fazer com que o *gate* somente seja liberado após a entrada do pulso de *trigger*, como na medida nº 3.

Na figura 5.2, podemos observar o erro introduzido em função de diferentes *delays* introduzidos pelos contadores divisores de freqüência da base de tempo. Este problema se torna mais crítico à medida que as freqüências medidas aumentam; apenas para citar um exemplo,

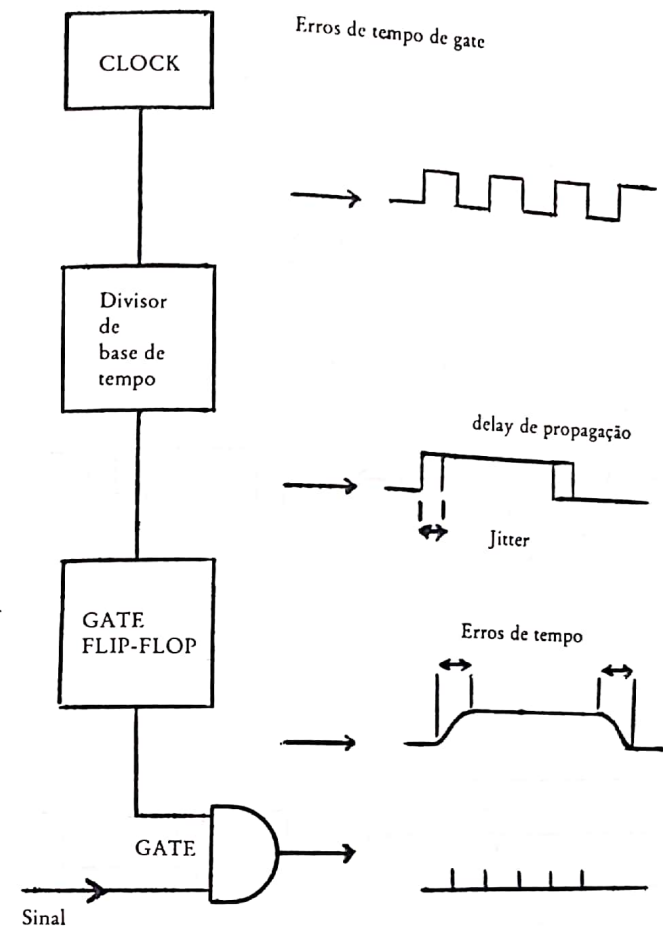


Figura 5.2

para medir-se freqüências na faixa de 500 *Mhz*, a instabilidade do pulso de *gate* (*jitter*) tem que ser muito menor que 1 nano segundo (10^{-9} segundo), o que requer circuitos de altíssima velocidade.

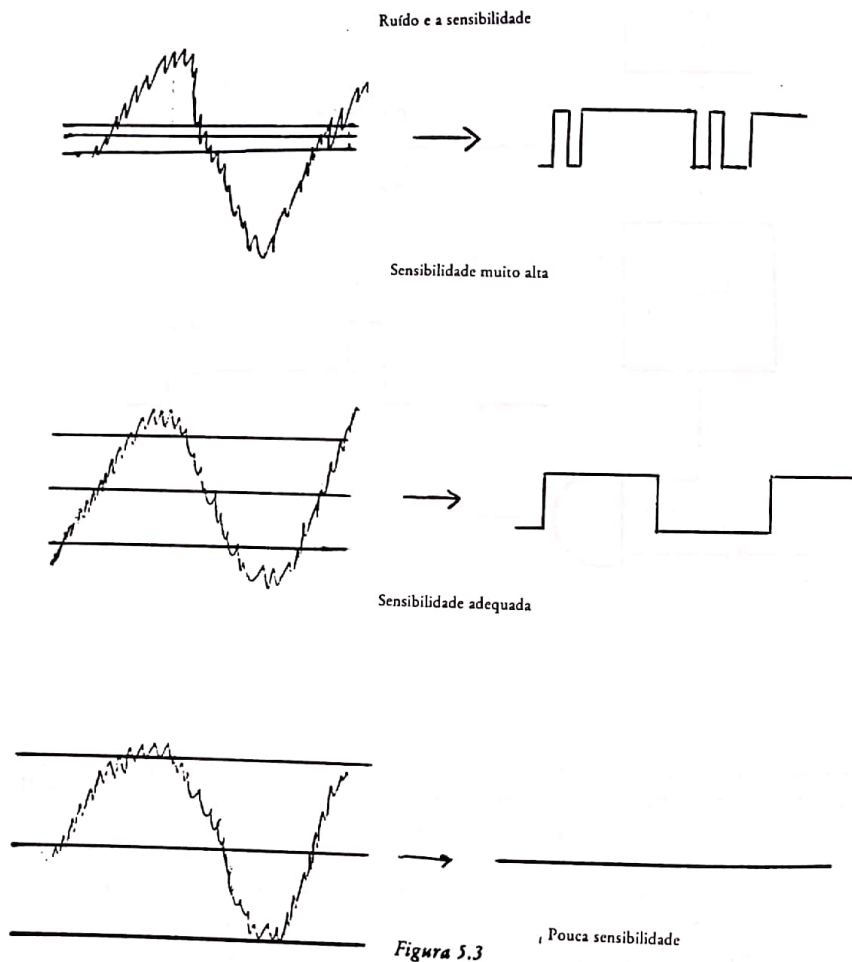
Uma alternativa para amenizar o problema chama-se técnica de "*prescaling*", que nada mais é do que dividir-se o sinal de entrada por '*N*' antes de medi-lo. Isto, entretanto, obriga-nos a aumentar o tempo do *gate* para obtermos a mesma indicação o mesmo número '*N*' de

vezes. A técnica de "prescaling" oferece uma alternativa econômica para medidas em frequências até a faixa de 1,5 GHz.

Os *prescalers* hoje utilizados são construídos com tecnologia *EECL*, o que lhes propicia a capacidade de manipular frequências razoáveis.

Outra causa de erro na contagem é o ruído sobreposto ao sinal a ser medido.

A forma como este ruído pode influir na medição pode ser facilmente observada na figura 5.3; nela observamos que níveis de ruído acima de determinados limites podem ser interpretados como sinal a ser contado, apesar do uso de circuitos tipo "schmitt-trigger".



Em baixas frequências, os erros causados devido a ruído usualmente predominam em relação aos erros causados por imprecisões da base de tempo.

Como pode-se concluir, o correto condicionamento do sinal de entrada é fundamental para que possamos efetuar uma medição corretamente.

São os seguintes os fatores de condicionamento do sinal de entrada:

- sensibilidade
- *range* dinâmico
- proteção a sobrecargas eventuais
- atenuação e controle automático de ganho
- ruído
- impedância
- banda passante
- nível de *trigger*
- histerese típica
- acoplamento de entrada (*ac* ou *dc*).

A função do circuito de condicionamento de entrada é a seguinte:

- amplificar sinais de baixa amplitude
- atenuar sinais com amplitude excessiva
- casar impedâncias
- transformar um possível sinal analógico ruidoso em sinal digital preciso.

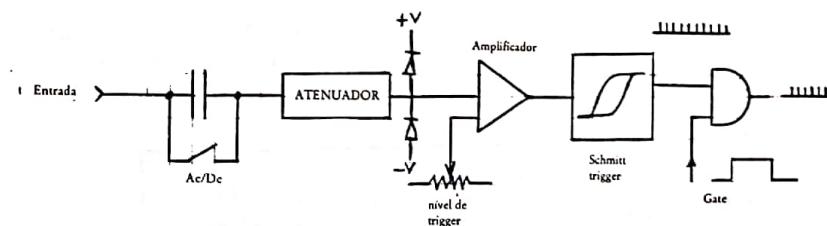


Figura 5.4

Banda passante larga, alta impedância de entrada e, por conseqüência, alta sensibilidade irão fazer com que o circuito de entrada responda a ruído com maior facilidade, e requerem cuidados extras nos mesmos para reduzir os erros.

TIME BASE

A frequência de referência, com a qual o sinal de entrada é comparado em tempo ou frequência, é normalmente gerada por um oscilador controlado por cristal. Sua performance é, em última análise, o limite de precisão máxima obtível num contador; suas características normalmente são um pouco mais difíceis de se compreender ao analisar as especificações de um dado contador.

CARACTERÍSTICAS DE UM OSCILADOR

- frequência (usualmente 1,5 ou 10 Mhz)
- mudança da frequência com:
 - a) tempo — longo período (envelhecimento)
 - b) tempo — curto período (estabilidade)
 - c) temperatura
 - d) alimentação
- tempo de aquecimento ("warm up")
- alimentação
- possibilidade ou não de ajustes

Os efeitos de tempo, temperatura e alimentação na frequência do oscilador são usualmente vistos em conjunto, porém devem ser considerados separadamente para determinar a precisão do oscilador.

Os cristais de quartzo utilizados na base de tempo dos contadores são usualmente cortados para frequências entre 1 e 10 Mhz em corte tipo AT; a curva característica de dependência frequência-temperatura para cristais cortados deste modo tem o formato da figura 5.5.

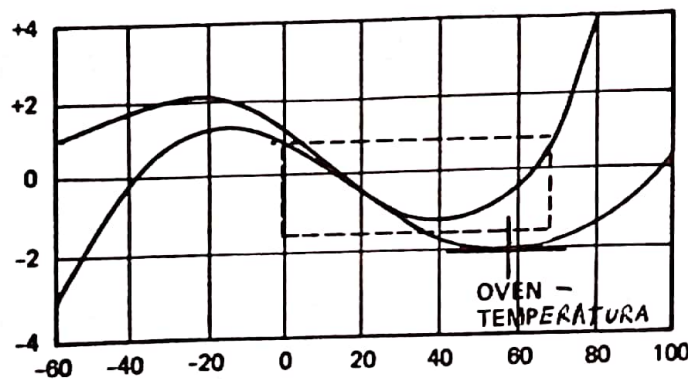


Figura 5.5

Para uma melhor performance em termos de variação de temperatura, dois métodos costumam ser usados:

- a) compensação utilizando componentes com variação inversa de características;
- b) mantendo-se a temperatura constante.

TCXO — "temperature compensated crystal oscillators" são osciladores que usam elementos que sentem a temperatura e corrigem as variações do cristal.

Estes tipos de osciladores normalmente apresentam um desempenho de 5 a 10 vezes mais estável que os sem compensação, ou cerca de 5×10^{-7} partes de O" a 50". Os TCXO apresentam boas especificações em termos de envelhecimento pois trabalham a baixas temperaturas. Baixo consumo e não necessidade de pré-aquecimento fazem deste tipo de oscilador o ideal para aplicações portáteis.

"Oven controlled oscillators" minimizam o efeito da variação de temperatura sobre a frequência, mantendo o oscilador numa câmara isolada termicamente do ambiente, com uma temperatura interna o mais constante possível.

A temperatura usualmente utilizada é de cerca de 65° C, e isto é fácil de compreender; dificilmente alguém irá operar um freqüencímetro em temperaturas superiores a esta, e quanto mais baixa a temperatura de operação do cristal, tanto mais lento seu envelhecimento.

Os ovens podem ser de dois tipos, ou com termostato simples (chave que liga ou não o elemento aquecedor), ou com termostato proporcional.

Este segundo tipo, de maior qualidade, mantém a temperatura constante com precisão de décimos de grau, o que permite estabilidade da ordem de $2 \times 10^{-10}/^{\circ}\text{C}$.

5.1 — MEDIÇÃO DE TEMPO

Tempo

Idade de terra (estimada): 1.6×10^{15} seg

Século: 3×10^9 seg

Ano: $3,1 \times 10^7$ seg

Mês: 2.6×10^6 seg

Dia: 8.64×10^4 seg

Hora: 3.6×10^3 seg

Minuto: 60 seg

Segundo: 10^0 seg

Milissegundo: 10^{-3} seg

Microsegundo: 10^{-6} seg

Menossegundo: 10^{-9} seg

Picossegundo: 10^{-12} seg

Femtosegundo: 10^{-15} seg

Attosegundo: 10^{-18} seg

Requerimentos para se efetuar uma medida de tempo:

- Referência ou instante inicial
- conclusão ou instante final
- Unidade de duração entre os dois eventos, ou "clock"

Conforme pode ser observado na figura 5.6, medidas de tempo com contadores podem ser feitas contando-se o número de pulsos de clock 'N' entre o pulso inicial e o final.

Os osciloscópios foram os primeiros instrumentos a serem utilizados para medições de tempo; nele as duas grandezas levadas em consideração são apresentadas simultaneamente (a amplitude pode ser encarada como os dois eventos delimitadores). Ocorre que a medição efetuada deste modo apresenta dois grandes inconvenientes:

- precisão: entre 0.5 e 5% (baixa)
- eventos únicos difíceis de observar (a não ser em casos com osciloscópios com memória ou digitais)

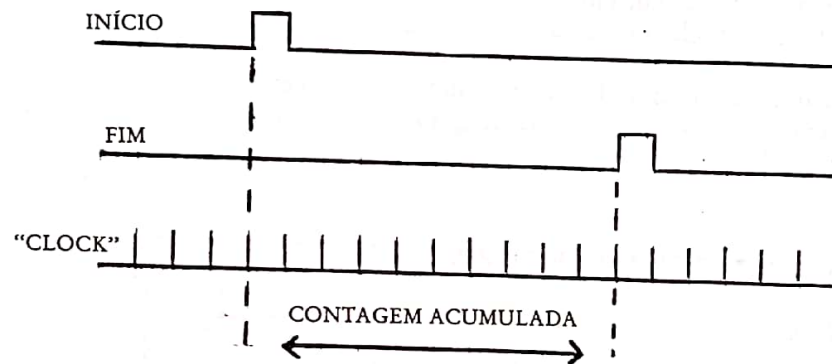


Fig. 5.6

Todos os aspectos antes mencionados são válidos para este tipo de medição, referentes à estabilidade, sensibilidade etc. Note-se, que enquanto na medição de frequência o número de pulsos contados depende de um pulso único, de duração definida (o gate), no caso da contagem de tempo introduzimos uma nova variável, o fim do evento.

Obviamente o mesmo instrumento, apenas com algumas alterações pode efetuar as duas medições (tempo e frequência).

Necessitamos apenas de mais um canal de entrada no instrumento, com especificações idênticas ao anteriormente analisado.

Na figura 5.7 temos o diagrama de blocos simplificado de um instrumento deste tipo.

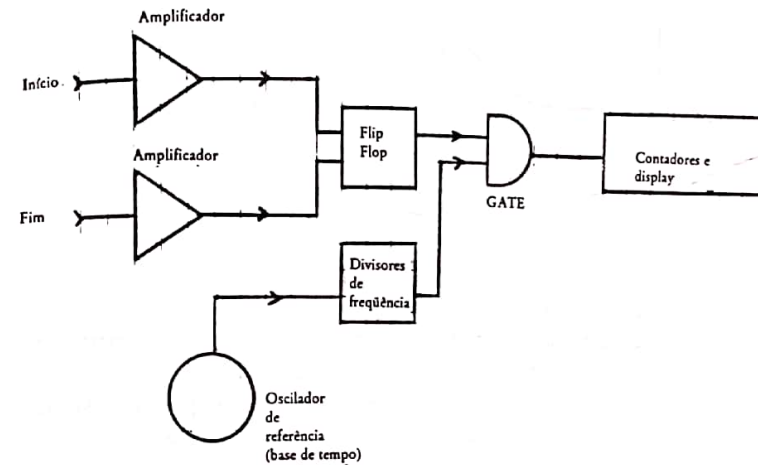


Figura 5.7

Existe aqui um aspecto que não foi considerado quando analisamos o princípio de operação de um freqüencímetro: a influência da banda passante (e do "slew rate") do amplificador de entrada na precisão da medida. Para tanto, considere a figura 5.8.

A diferença de tempo $T_2 - T_1$ será o erro resultante da medição.

Existe também uma outra forma de introdução de erros na medição de intervalo de tempo, para isto consideremos o caso de um contador que tenha uma ponteira (ou cabo) maior que a outra (mais longa): como seria de se esperar, devido ao delay maior se esta ponteira está colocada na entrada "stop" do instrumento, o tempo medido será maior que o real, pois o pulso chegará mais atrasado ao instrumento.

O perfeito casamento de impedâncias também afetará a medida pelas mesmas razões, uma vez que o mesmo não ocorrendo, teremos retardos indesejados.

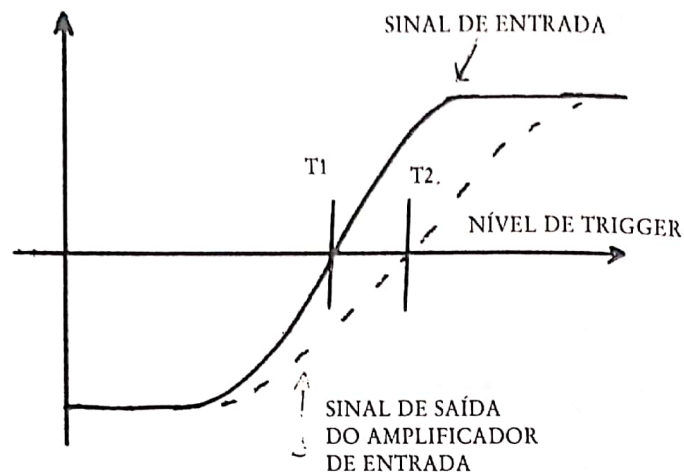


Figura 5.8

Ficam, portanto, duas recomendações importantes:

- sempre utilize cabos iguais (mesmo comprimento), principalmente em medições de curtos intervalos de tempo;
- quando efetuar medições em impedância baixas, procure sempre casar a impedância das entradas do instrumento ao circuito.

5.2 — MEDIÇÕES DE FREQUÊNCIA NA FAIXA DE SHF

Conforme comentamos antes, as técnicas de componentes atuais nos permitem efetuar medições diretas ou com *prescalers* até a faixa de 1.5 GHz (alguns fabricantes já estão conseguindo um pouco mais, porém de instrumentos de custo mais elevado).

Entretanto, sabe-se que existem hoje contadores capazes de medir frequências tão elevadas quanto 40 GHz. Veja bem, são 40.000.000.000 de pulsos por segundo...

Obviamente ainda não dispomos de circuitos tão velozes assim, entretanto existem atualmente técnicas alternativas que permitem efetuar medições nesta faixa com excelente precisão.

Conversor heteródino

Esta técnica utiliza o mesmo princípio de um receptor de rádio convencional; num *mixer* são “batidos” o sinal de microondas que desejamos medir com um oscilador altamente estável, interno, gerando um sinal de “FI” na faixa mensurável com as tecnologias hoje disponíveis.

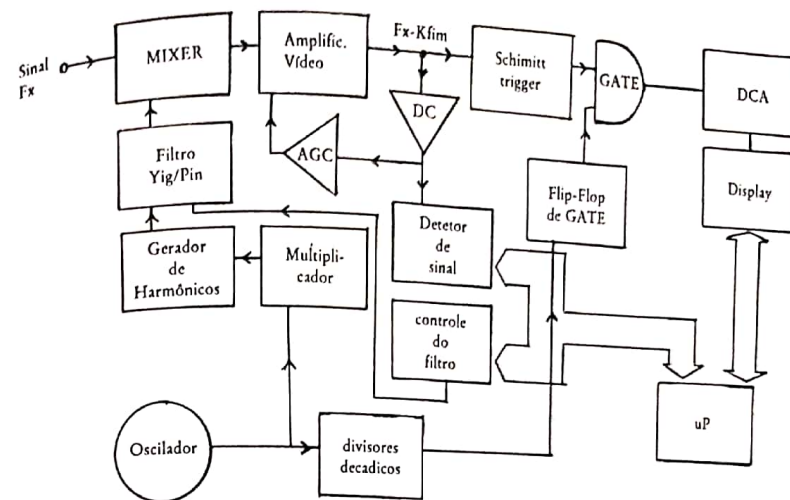


Figura 5.9 — Diagrama de blocos simplificado

A figura 5.9 apresenta o diagrama de blocos simplificado de um contador que utiliza-se desta tecnologia. Note que no exemplo mostrado, a frequência do oscilador local (*YIG/PIN switch filter*) é automaticamente ajustada por um microprocessador. Nos modelos mais antigos, a frequência era ajustada manualmente sendo observado um medidor de amplitude, e então lida a frequência. Com a facilidade dos microprocessadores, hoje o próprio instrumento determina a frequência para conversão, sendo inclusive efetuada a varredura para determinar em que faixa está o sinal na entrada do instrumento.

Oscilador de transferência

Os contadores que utilizam esta técnica rebaixam a frequência a ser medida de forma diferente da anterior. Consta esta técnica de um oscilador de baixa frequência, que pode ser locado em fase com o sinal de microondas que desejamos medir; esta baixa frequência pode ser medida sem problemas.

O detalhe, entretanto, é que necessitamos de um *PLL* capaz de locar em altíssimas frequências, o que já apresenta uma razoável dificuldade.

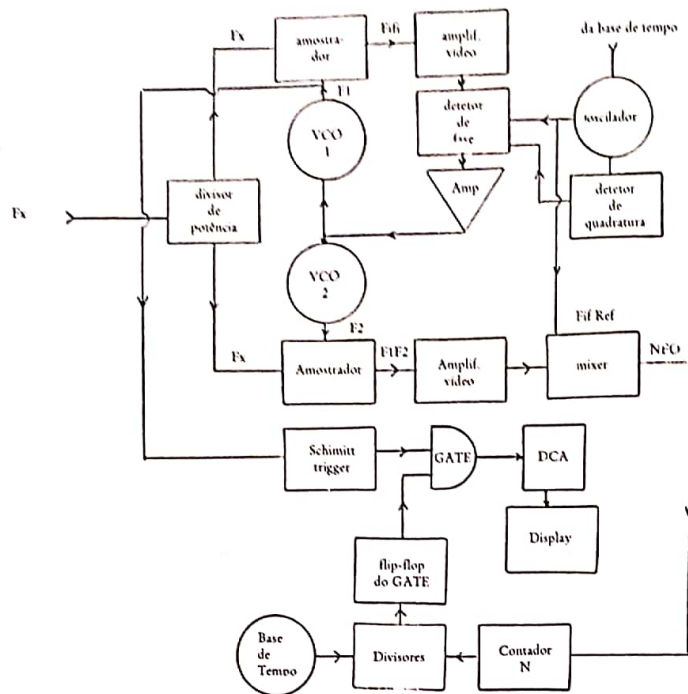


Figura 5.10

A figura 5.10 apresenta o diagrama de blocos simplificado de um freqüencímetro de SHF fabricado pela Hewlett-Packard (modelo Hp 5340), capaz de efetuar medições até 18 Ghz; bastante utilizado na manutenção de rádios de SHF em empresas de telecomunicações.

Tal instrumento utiliza um gerador de harmônicas para seu VCO (oscilador controlado por tensão) capaz de produzir sinais utilizáveis até a 180 ordem (aproximadamente 33 Ghz). O detalhe principal, neste caso, é que o instrumento determina qual o harmônico (ordem) que está sendo utilizado, para então apresentar o resultado no display.

Na figura 5.10 o sinal de entrada é mostrado em fase locada com o VCO 1 na posição superior da seção conversora. Uma vez que a captura (*lock*) é obtida, a relação entre a entrada e a freqüência do VCO é $f_x = Nf_1$, sendo N um inteiro. O restante do conversor é dedicado a determinar N .

O contador pode então medir f_1 (tipicamente entre 100 e 200 Mhz) e multiplicar o resultado por N .

O detetor de quadratura no PLL do oscilador automático de transferência assegura que a saída de VCO 1 mantenha a correta relação de fase com o sinal de entrada.

Conversor heteródino harmônico

Conforme o próprio nome indica, este processo é uma mescla das duas técnicas anteriores. A figura 5.11 apresenta o diagrama de blocos deste tipo de contador.

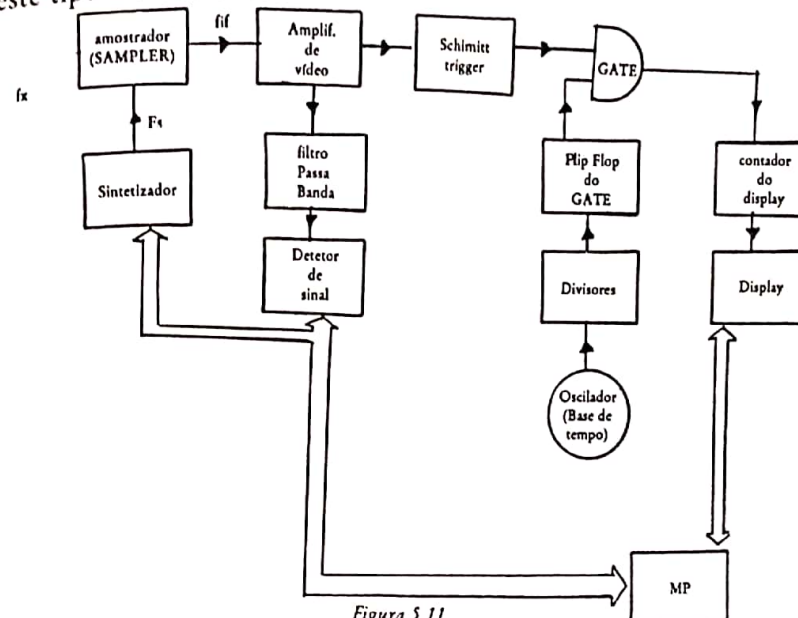


Figura 5.11

A rotina de aquisição de dados deste tipo de conversor é a seguinte: O microprocessador ajusta a freqüência do sintetizador (f_s) até que o detetor de sinal indique a presença de f_{if} na faixa apropriada (definida pelo filtro passa-baixas). A seguir, o número do harmônico ' N ' precisa ser determinado, como no processo do oscilador de transferência. O método do oscilador de transferência pode ser utilizado. Entretanto, existe uma maneira mais simples, utilizando o recurso do processador: a freqüência do sintetizador é variada ligeiramente para cima e para baixo, e o processador observa a diferença nas leituras. Baseado nestas, ele determina o número do harmônico. A freqüência determinada pelo processador, mais o número do harmônico, mais a leitura da FI são então utilizadas para calcular a freqüência de entrada: $F_x = Nf_s + f_{if}$.

O conversor heteródino harmônico apresenta a vantagem de ser construído a um custo bem inferior que os outros dois tipos, pois ele utiliza

decisões, e cálculos em geral podem ser efetuados por um microprocessador de baixo custo.

Comparação de performance entre as técnicas de conversão

Velocidade: O primeiro e o segundo método se equivalem. O último é o mais lento dos três (leva cerca de 350 *mS*);

Range de frequência: C. heteródino — 20 *Ghz*, Osc. transf. — 23 *Ghz*, Conv. het. harm — 40 *Ghz*;

Tolerância a AM: C.H. — 50%; O.T. — 90%; C.H.H. — 90% ou mais.

5.3 — CALIBRAÇÃO E AFERIÇÃO DE CONTADORES DE FREQUÊNCIA E TEMPO

Após examinarmos alguns dos principais parâmetros que envolvem o funcionamento dos contadores de frequência/tempo, vamos comentar alguns aspectos importantes de frequência/tempo, vamos comentar alguns aspectos importantes a respeito de sua calibração.

a) Observe sempre que as informações contidas no manual do fabricante sejam seguidas: evite “bypassar” etapas no processo de calibração. Esta observação é válida para qualquer tipo de instrumento.

b) Os ajustes devem começar pela fonte de alimentação. Mesmo que ela não disponha de ajustes, certifique-se que a mesma está fornecendo as tensões adequadas. Para os testes de variação de alimentação primária; uma fonte aparentemente boa pode apresentar variações imperceptíveis se alimentada com tensão constante.

c) Observe sempre o tempo de pré-aquecimento especificado no manual antes de efetuar qualquer ajuste.

d) Não esqueça que o instrumento com a tampa superior ou inferior removidas não terá a mesma temperatura interna; isto pode alterar bastante um ajuste.

e) Considerando-se que o próprio cristal utilizado na base de tempo envelhece, procure aferir, de tempos em tempos, a precisão do seu instrumento; se for o caso, ajuste-o.

f) Lembre-se que um eventual ajuste na frequência do instrumento somente será válido se dispusermos de uma referência mais estável e precisa que o nosso instrumento (pelo menos 10 vezes).

g) As medições do circuito de condicionamento (entrada) são muito importantes, conforme previamente discutido. Verifique principalmente a sensibilidade no limite superior de frequência de cada faixa (se houver mais de uma).

h) Observe se a indicação de “low battery” condiz com o especificado no manual, no caso de instrumentos alimentados por pilha ou bateria recarregável.

i) Finalmente, deixe o instrumento operando por algumas horas e verifique se o mesmo não altera significativamente sua indicação.

5.4 — MANUTENÇÃO DE CONTADORES DIGITAIS

A manutenção dos contadores deve seguir as mesmas premissas adotadas para qualquer outro tipo de instrumento eletrônico de precisão.

a) Para manutenção da fonte de alimentação, procure limitar o consumo máximo (hipótese de um curto-circuito no secundário do transformador de alimentação) utilizando uma lâmpada incandescente em série com o instrumento. Esta prática permite que, mesmo com um eventual curto-circuito (ou excesso de consumo em algum circuito), o instrumento possa ser ligado, para podermos então efetuar algumas medições. Costumo utilizar uma lâmpada de 100 *watts* (que em 110 *volts* limita a corrente máxima em menos de 1 *ampère*) para a maioria dos instrumentos que já reparei, além de um transformador isolador. Aliás, o uso do transformador é particularmente interessante considerando-se, entre outras vantagens, o aspecto da possibilidade de eventuais choques.

b) Como os contadores digitais normalmente têm grande quantidade de circuitos integrados, e, como em outros tipos de instrumentos, a alimentação normalmente é uma só para todos eles (normalmente 5 *volts*), quando algum apresenta excesso de consumo é comum termos dificuldade para localizá-lo (lembre-se que todos estão em paralelo). Como a remoção por tentativa não é aconselhável, uma vez que na retirada poderemos danificar componentes bons, além do risco de danificar o circuito impresso, recomendo a seguinte técnica:

— desligue a fonte do instrumento (se houver mais que uma, interrompa aquela que está sobrecarregada);

— tome uma fonte de alimentação que disponha de ajuste de tensão e limitação de corrente;

— ajuste esta fonte de modo que sua tensão de saída seja igual à da fonte do instrumento que iremos substituir;

— coloque a saída desta fonte ajustável em curto-circuito, ajuste a corrente de saída para um valor em torno de 0,5 *ampères*;

— alimente então o circuito com curto com esta fonte de alimentação.

O passo seguinte consiste em tomar um multímetro digital e conectar seu negativo junto ao negativo da fonte (quanto mais próximo, melhor).

Com a ponteira positiva, mede-se a tensão junto ao ponto aonde estamos alimentando o circuito. Se o consumo for muito alto, a tensão neste ponto será muito baixa; selecione a escala de maior sensibilidade do multímetro.

O passo seguinte consiste em sair acompanhando o filete de alimentação de tal forma que a tensão vá diminuindo (esta indicação significa que estamos nos aproximando do ponto de curto).

Este processo nada mais é do que utilizarmos a resistência ôhmica dos filetes para localizarmos o componente defeituoso. A preocupação de ajustarmos a fonte para a mesma tensão nominal que a fonte original do instrumento se justifica, uma vez que eventualmente pode o causador do curto-circuito abrir; se a tensão de saída for muito alta,...

Para os incrédulos desta técnica, sugiro consertar um contador com placas cheias de TTL's, sem soquete...

c) Uma forma rápida de tentar localizar integrados com defeito é observar se algum pino de algum deles apresenta um nível de tensão "proibido" (nível intermediário entre o zero e o um lógico).

d) Sejam objetivos: havendo a desconfiança e a disponibilidade, troque o componente. O custo de eventuais pesquisas muito aprofundadas, pode ser mais oneroso (custo homem/hora, equipamento/hora) que um integrado comum.

e) Defeitos no *display* (segmentos sempre acesos ou apagados) podem ser interpretados da seguinte forma: os *displays a led* (caso da maioria), por razões de consumo, são usualmente multiplexados (vide figura 5.12).

Isto significa que cada dígito é alimentado isoladamente, de forma seqüencial, de tal forma que a cada instante apenas um dígito está aceso.

Esta varredura é efetuada com velocidade suficiente de forma que nosso olho não consegue perceber. Por conseqüência, se um mesmo segmento de todos os dígitos apresenta-se erroneamente, deve-se verificar o *latch* correspondente. Por outro lado, se apenas um dígito tem problemas, deve-se desconfiar do *drive* do dígito correspondente ou então do próprio *display*.

f) Se o contador que estivermos reparando dispuser de saída externa da base de tempo interna, não necessitaremos de gerador de sinal para verificar a operação e mesmo trabalhar no reparo do nosso contador; basta que para isto interliguemos esta saída com a entrada do próprio contador.

g) Os integrados utilizados nos *prescaler* de freqüencímetros normalmente são componentes caros; por isto, os fabricantes de alguns instrumentos costumam dotar o circuito de entrada dos mesmos de um



Fig. 5.12

pequeno fusível, o qual protege o integrado e o resistor de entrada (em 50 ohms).

Se eventualmente este fusível abre, em função de alguma sobrecarga, o instrumento pára de funcionar naquela entrada ou então perde a sensibilidade para baixas freqüências (a pequena capacitância é suficiente para permitir que o instrumento continue efetuando medidas em freqüências mais altas e com níveis maiores).

	Simbologia européia		Simbologia americana
Porta "E" (AND)			
Porta "E" com entrada negada			
Porta "NOU" ¹ (NOR)			
Porta "OU" (OR)			
Porta "EXOU" (EXOR)			

TABELA DE CONVERSÃO DE SÍMBOLOS LÓGICOS