

# O DESEMPENHO DINÂMICO DO OSCILADOR E DO REGULADOR INTERNO DO CONTROLADOR PWM 3524

Carlos Roberto Fragnito\*§

002/86 CRF/MON

B.J. Mass\*

(Maio de 1986)

Resumo: Neste relatório o desempenho dinâmico do regulador de referência e do oscilador interno do controlador PWM 3524 é descrito. Dados sobre a variação da tensão de referência, bem como frequências medidas para diversas combinações de valores do resistor e capacitor externos, e ainda dados sobre a variação da frequência com a variação da tensão de entrada são incluídos.

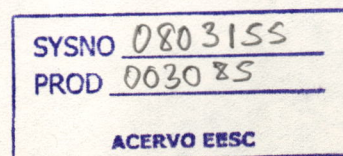
Abstract: In this report the dynamical performance of the reference regulator and of the internal oscillator of the 3524 PWM controller is described. Data on the variation of the reference voltage as well as frequencies measured for several pairs of external capacitor and resistor values, and data on the variations of the frequency in response to the variation of the input voltage are included.

---

\* Depto. de Eletricidade, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, CP 359, 13560 São Carlos.

\* § Aluno de Graduação.

080 3155



## 1. Introdução

O 3524 contém internamente um regulador de referência, que fornece em sua saída uma tensão de aproximadamente 5 V. Essa tensão, além de ser usada como tensão de alimentação para os diferentes blocos internos deste circuito integrado, pode também ser usada como um nível DC de referência para o controle da tensão de saída externa do dispositivo.

O oscilador interno do 3524 possui duas formas de onda de saída: retangular e dente-de-serra. O valor da frequência de oscilação é especificado por um resistor e um capacitor ligados externamente ao dispositivo. Conforme exposto no relatório nº1, [ 7 ], os detalhes disponíveis a respeito da dinâmica desses blocos são limitados, tornando necessário a realização de medidas experimentais com vistas a uma melhor compreensão do 3524. Algumas dessas medidas foram realizadas nos laboratórios didáticos do Departamento de Eletricidade da EESC, em unidades do 3524 fabricadas pela firma americana Unitrode. Os resultados são a seguir descritos.

## 2. O Regulador Interno de Referência

Nesta seção foram efetuados testes para verificar o desempenho do regulador de referência. Para isso, o 3524 foi montado na configuração mostrada na Fig.2.1.

Observe-se que, devido ao interesse dessa seção ser somente o desempenho do regulador interno (e, na próxima seção, o oscilador), o 3524 foi ligado de forma que os circuitos amplificador de erro e limitador de corrente foram desativados. Também, os pinos de compensação, corte e dos tran

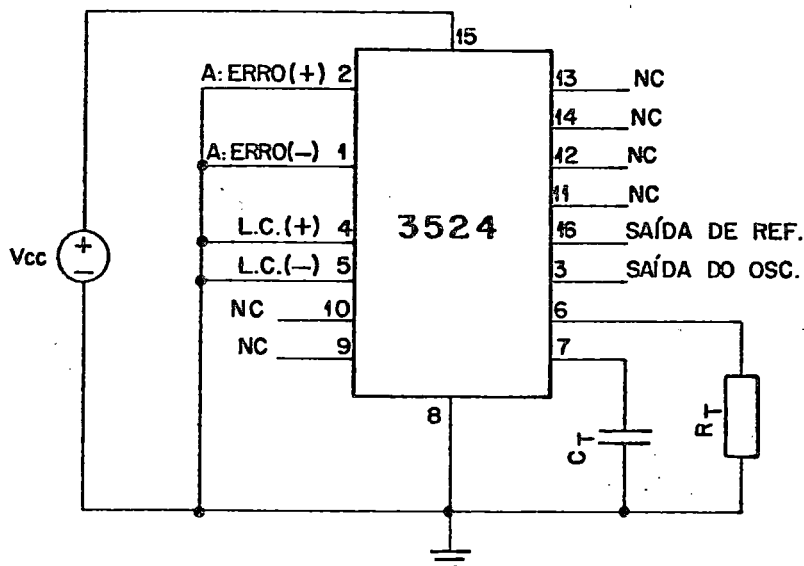


FIGURA 2.1. CIRCUITO EMPREGADO PARA AS MEDIDAS DE DESEMPENHO DO REGULADOR E DO OSCILADOR INTERNO.

sistores de saída foram deixados desligados.

Os valores do resistor  $R_T$  e do capacitor  $C_T$  foram escolhidos de forma a obter uma frequência do oscilador de aproximadamente 20 kHz.

Inicialmente foi medido, com um voltímetro digital, o valor DC da tensão de saída do regulador de referência, com a entrada variando de 5,0 a 34,0 V. Os resultados estão mostrados, em forma gráfica, na Fig.2.2. Observou-se que, na faixa de 8,0 a 34,0 V de entrada, o valor da tensão de referência manteve-se praticamente constante, variando de 4,941 V a 4,963 V, ou seja, 0,44 % do valor médio. Para tensões de entrada menores que 8,0 V a tensão de referência apresentou uma queda acentuada, caindo a aproximadamente 3,3 V para  $V_{CC} = 5,0$  V. Essa região, abaixo de 8,0 V, é uma região não recomendada para operação do dispositivo.

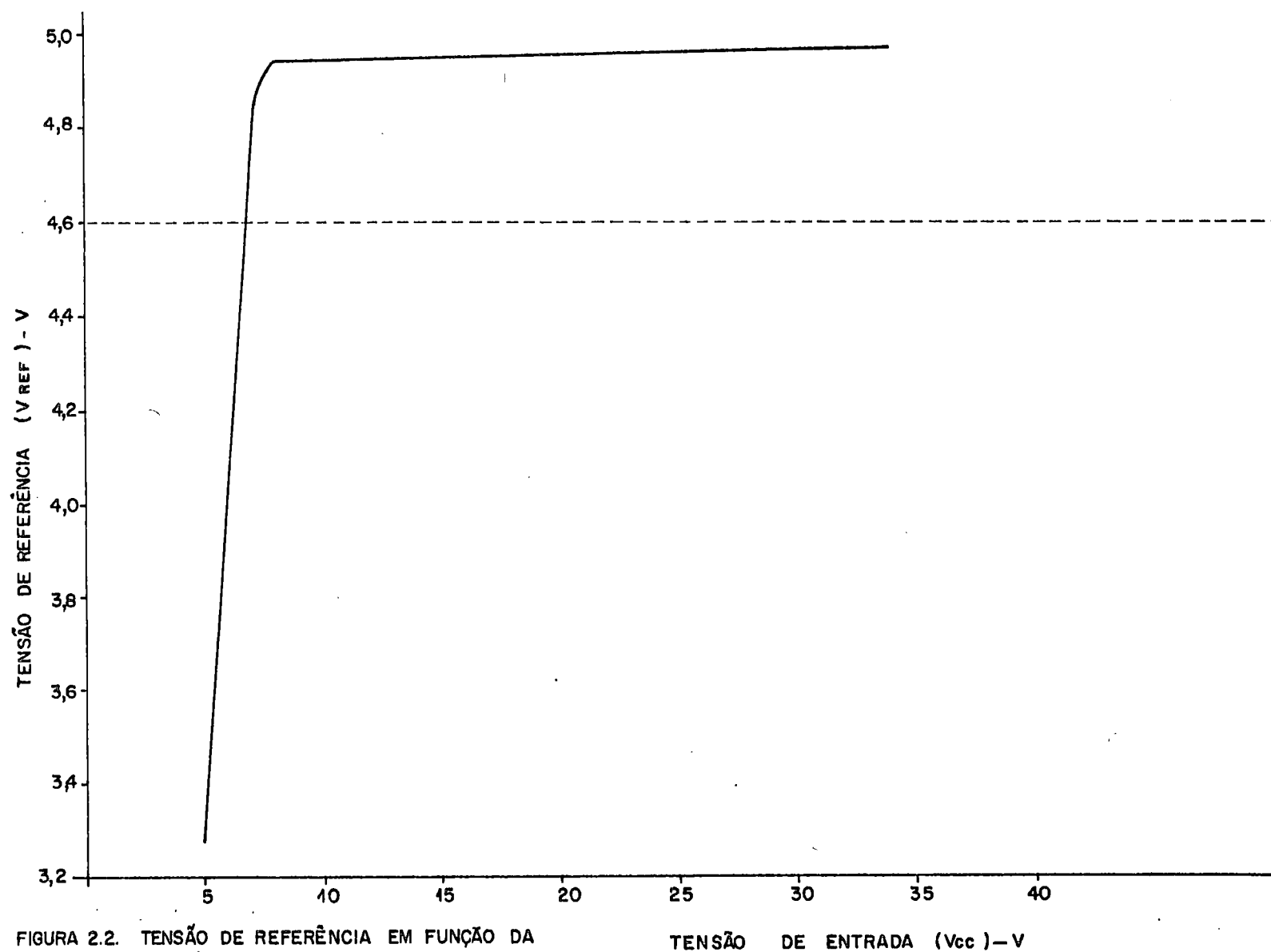


FIGURA 2.2. TENSÃO DE REFERÊNCIA EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE ENTRADA.

TENSÃO DE ENTRADA ( $V_{cc}$ ) - V

## 2.1. Sinal Triangular na Saída do Regulador de Referência

A flutuação presente na tensão de saída do regulador de referência foi analisada utilizando-se um osciloscópio acoplado no modo AC.

Observou-se para  $V_{cc}$  acima de +7,05 V não a flutuação usual associada à filtragem capacitiva de sinais retificados, mas uma forma-de-onda perfeitamente triangular (Fig.2.3) com 260 mV<sub>pp</sub> e frequência fundamental de 12,5 MHz.

A constatação desse sinal foi inesperada e sua origem não pode ser explicada em termos da arquitetura do sistema 3524. Uma limitação nesse sentido é o fato do regulador de referência ser um bloco totalmente independente dos demais não tendo sua estrutura explicitada nas folhas de dados dos fabricantes. Esperamos poder esclarecer esse ponto com uma futura consulta direta aos fabricantes das unidades testadas.

Tanto a frequência como a amplitude mantiveram-se essencialmente constantes quando a tensão de entrada variou de 7,05 V a 34,0 V. O mesmo sinal com as mesmas características foi observado em diferentes unidades do 3524, fabricadas pela Unitrode.

Dado o valor da frequência, o sinal triangular foi inicialmente associado a uma possível interferência (RF) e procurou-se verificar uma possível origem nos equipamentos eletrônicos próximos, mas com resultados negativos. O oscilador interno do 3524 foi também desativado, pela retirada dos componentes  $R_T$  e  $C_T$ . No entanto, os resultados foram negativos, pois a forma-de-onda permaneceu.

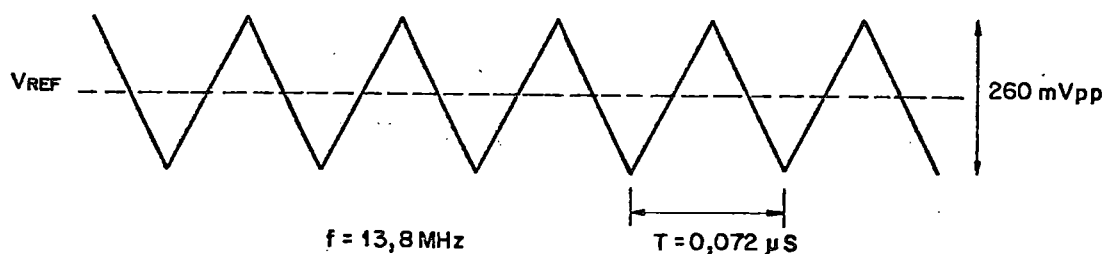


FIGURA 2.3. FORMA DE ONDA OBSERVADA NA TENSÃO DE REFERÊNCIA.

Com  $V_{CC}$  abaixo de 7,05 V essa forma-de-onda desaparece, e a flutuação observada da tensão de referência é uma forma-de-onda aleatória, de amplitude muito pequena, que não pode ser medida com o osciloscópio.

Observação: A operação do 3524 com o oscilador interno funcionando, interferiu em outros circuitos (no caso, amplificadores) que estavam ligados próximos ao local. A interferência observada foi uma modulação do sinal de saída do amplificador.

## 2.2. Resposta a Degrau do Regulador de Referência

Foi também realizado um teste para verificação do desempenho dinâmico do regulador de referência. Para isso foi utilizado o circuito da Fig.2.4, e procurou-se obter para a tensão de entrada  $V_{CC}$  uma seqüência de degraus positivos e negativos superpostos a um nível DC tal que o valor mínimo da tensão total ficasse sempre dentro da região permitida para a entrada ( $8\text{ V} < V_{CC} < 34\text{ V}$ ). Esse procedimento é parecido com o padronizado por alguns fabricantes [1]. Essa seqüência foi obtida com um gerador de onda quadrada e uma fonte de tensão DC ligados em série, conforme mostra a Fig.2.4.

O gerador forneceu uma forma-de-onda quadrada com aproximadamente 5 V de amplitude (máxima), enquanto a fonte DC foi ajustada para um valor escolhido de forma que a tensão de saída do conjunto variasse de 0 a 8 V (onda quadrada). A ligação do circuito dessa maneira introduziu algumas pequenas distorções na forma de onda quadrada, que não foram consideradas.

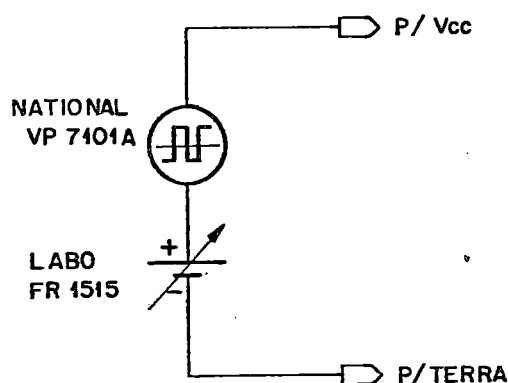
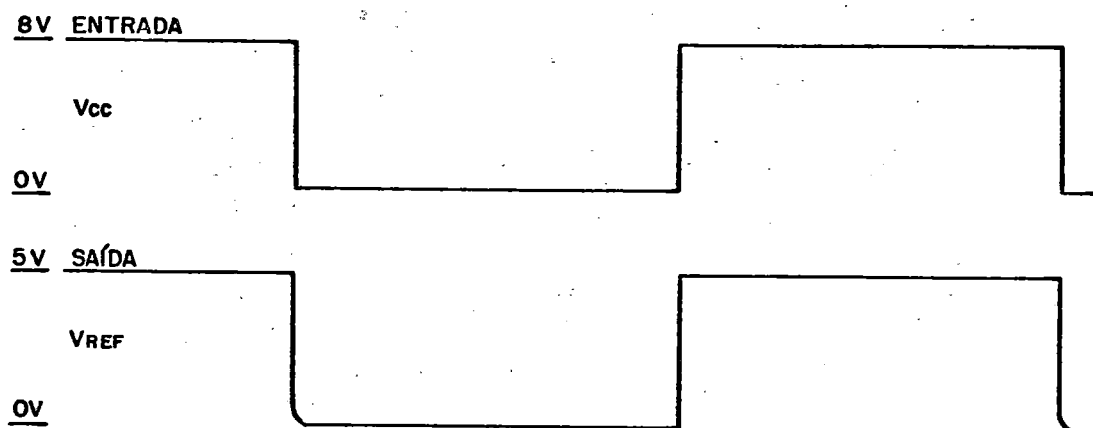


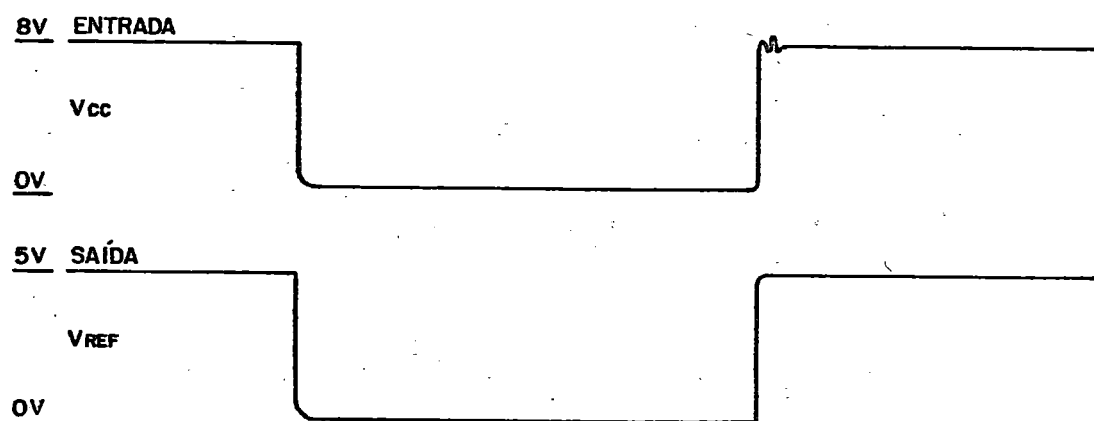
FIGURA 2.4. ARRANJO PARA SINTETIZAR SEQUÊNCIAS DE PULSOS COM MÉDIA NÃO NULA EMPREGADAS PARA AVALIAR A RESPOSTA A DEGRAU DO 3524.

Foram empregadas as seguintes frequências de onda quadrada: 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz e 1 MHz (ver Figuras 2.5 e 2.6). Para frequências baixas (abaixo de 10 kHz) a forma-de-onda da tensão de entrada não apresentou distorções. Para frequências altas as distorções existentes não permitiram medidas confiáveis. Observou-se que, para a frequência de 1 MHz, a forma-de-onda da tensão de entrada foi completamente alterada devido ao carregamento do gerador.

Apesar das medidas não serem muito precisas, pode-se verificar que a resposta do regulador de referência a mudanças na tensão de entrada é muito rápida. Para todos os ca

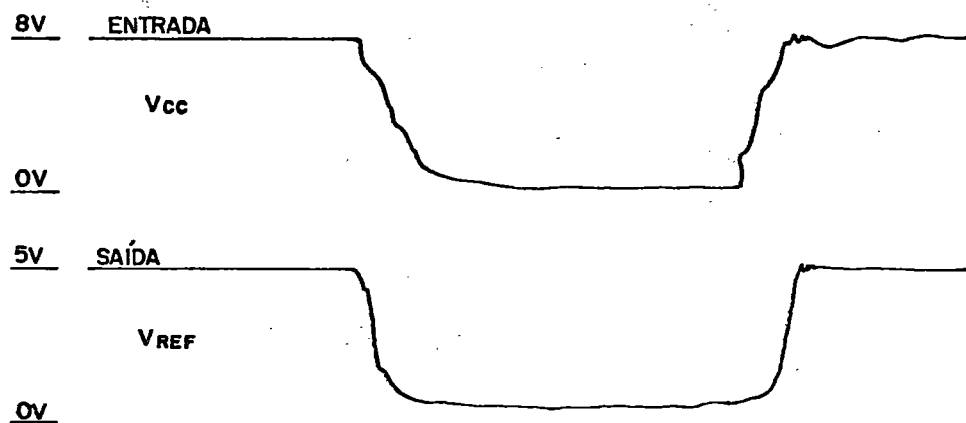


(a) 1 KHz (ESCALA DE TEMPO : 10  $\mu$ s/mm )

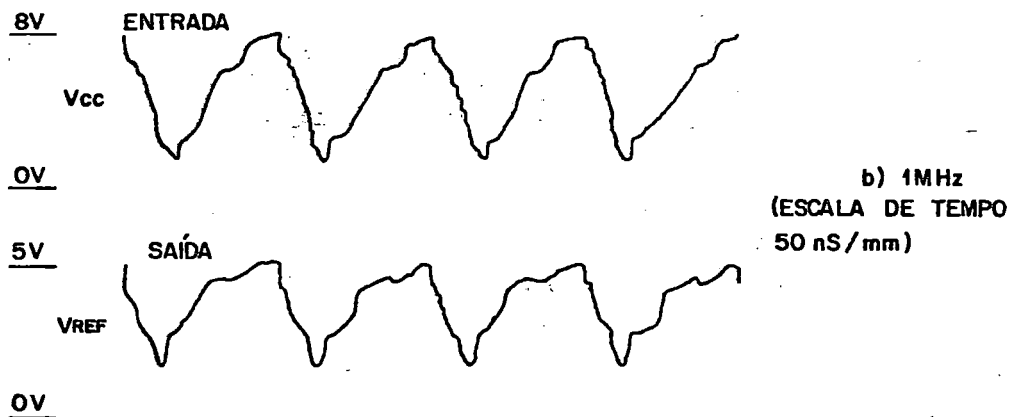


(b) 10 KHz (ESCALA DE TEMPO : 0,83  $\mu$ s/mm )

FIGURA 2.5 RESPOSTA A DEGRAU DO REGULADOR INTERNO DO 3525. SINAIS DE ENTRADA APLICADAS NO PINO DE ALIMENTAÇÃO. SINAIS DE SAÍDA EXTRAÍDOS DO PINO DE SAÍDA DE REFERÊNCIA.



a) 100 KHz (ESCALA DE TEMPO :  $0,1\mu\text{s}/\text{mm}$ )



b) 1MHz  
(ESCALA DE TEMPO  
 $50\text{ nS}/\text{mm}$ )

FIGURA 2.6. RESPOSTA DO REGULADOR INTERNO DO 3524. O GERADOR DE ONDA QUADRADA FOI SEVERAMENTE CARREGADA PARA FREQUÊNCIAS ACIMA DE 50 KHz. ENTRADA: PINO DE ALIMENTAÇÃO. SAÍDA: PINO DA TENSÃO DE REFERÊNCIA.

sos, os tempos de subida e descida da forma-de-onda da tensão de referência foram menores que os tempos correspondentes no sinal de entrada.

### 3. O Oscilador Interno

Um dos parâmetros mais importantes do oscilador interno é a frequência, para a qual os fabricantes fornecem uma expressão aproximada (3.1) em função dos parâmetros  $R_T$  e  $C_T$ .

$$f \approx \frac{1,15}{R_T \cdot C_T} \quad (3.1)$$

onde  $R_T$  está em  $k\Omega$

$C_T$  está em  $\mu F$

$f$  está em kHz

com os seguintes valores recomendados:

$$0,001 \leq C_T \leq 0,1 \quad \mu F$$

$$1,8 \leq R_T \leq 100 \quad k\Omega$$

Para verificar o desempenho do oscilador foi utilizado o mesmo circuito já referido no capítulo 2 (mostrado na Fig.2.1) e diversos valores de resistência e capacitância, de modo a possibilitar um amplo conjunto de medidas. Para minimizar erros, os valores dos componentes utilizados nos cálculos (Tabela 3.1), não foram os nominais, mas sim os valores medidos com uma ponte RLC (Ponte RLC Gen Rad, 1657 RLC - DIGI-BRIDGE).

### 3.1. Medidas de Frequência

Por uma questão de facilidade, as frequências foram medidas com um osciloscópio de baixo custo (MINIPA modelo MO 1220) o que explica em parte as discrepâncias entre os valores teóricos e os experimentais.

Dez frequências diferentes foram obtidas e medidas, possibilitando uma comparação com os valores previstos pela expressão (3.1). O resultado global é de uma grande divergência entre ambos conjuntos (Tabela 3.1), levando a uma tentativa de aperfeiçoar o modelo implícito na expressão (3.1).

Os processos de medida de  $f$ ,  $R_T$  e  $C_T$  são incertos, mas como os parâmetros  $R_T$  e  $C_T$  foram medidos com uma ponte de boa qualidade, provavelmente a incerteza nas medidas de  $f$  é a predominante dos três processos. Já que as frequências foram medidas pelo processo de inversão de período, com um osciloscópio que não pode ser considerado do estado-da-arte, numa primeira aproximação os valores medidos apresentam uma incerteza cujos limites não são conhecidos quantitativamente, mas cuja causa está no uso do osciloscópio.

### 3.2. Tratamento dos Dados

Para tentar compensar os desvios aleatórios nas medidas, os dados foram aproximados por regressão para dois modelos que produzem gráficos lineares em coordenadas bilogáritmicas. Com o primeiro modelo (3.2) a idéia foi compensar os erros mantendo o modelo (3.1), mas alterando a constante do numerador e aproximando pelo método dos mínimos quadrados [ 5 ] para obter o valor ótimo da constante.

Tabela 3.1

Frequências Medidas Versus Frequências Esperadas Teoricamente de acordo com a Expressão (3.1).

| $R_T (\Omega)$ | $C_T (nF)$ | $f(Hz)$<br>medidas | $f(Hz)$<br>teóricas | $\Delta \%$ |
|----------------|------------|--------------------|---------------------|-------------|
| 999            | 1,08       | 384 615,00         | 1 065 880,70        | + 177,1     |
| 1 785          | 1,08       | 285 714,00         | 596 534,91          | + 108,8     |
| 3 787          | 4,47       | 53 191,00          | 67 935,22           | + 27,7      |
| 6 910          | 6,59       | 21 505,00          | 25 254,24           | + 17,4      |
| 27 190         | 9,97       | 4 000,00           | 4 242,22            | + 6,0       |
| 98 870         | 9,97       | 1 123,00           | 1 166,64            | + 3,9       |
| 48 170         | 32,91      | 806,40             | 725,43              | - 10,0      |
| 83 300         | 56,54      | 277,80             | 224,17              | - 19,3      |
| 98 870         | 103,88     | 137,00             | 111,97              | - 18,3      |
| 222 900        | 215,40     | 28,57              | 23,95               | - 16,2      |

$$f = \frac{k}{R_T C_T} \quad (3.2)$$

Fixando um valor de  $R_T$  ou de  $C_T$  obtemos uma reta parametrizada respectivamente em  $R_T$  ou  $C_T$  num gráfico Log-log, do tipo normalmente apresentado pelos fabricantes [ 4 ] e visto nas Figuras 3.1 e 3.2.

As diferenças entre valores medidos e valores calculados através da expressão (3.2) diminuíram em relação às di-

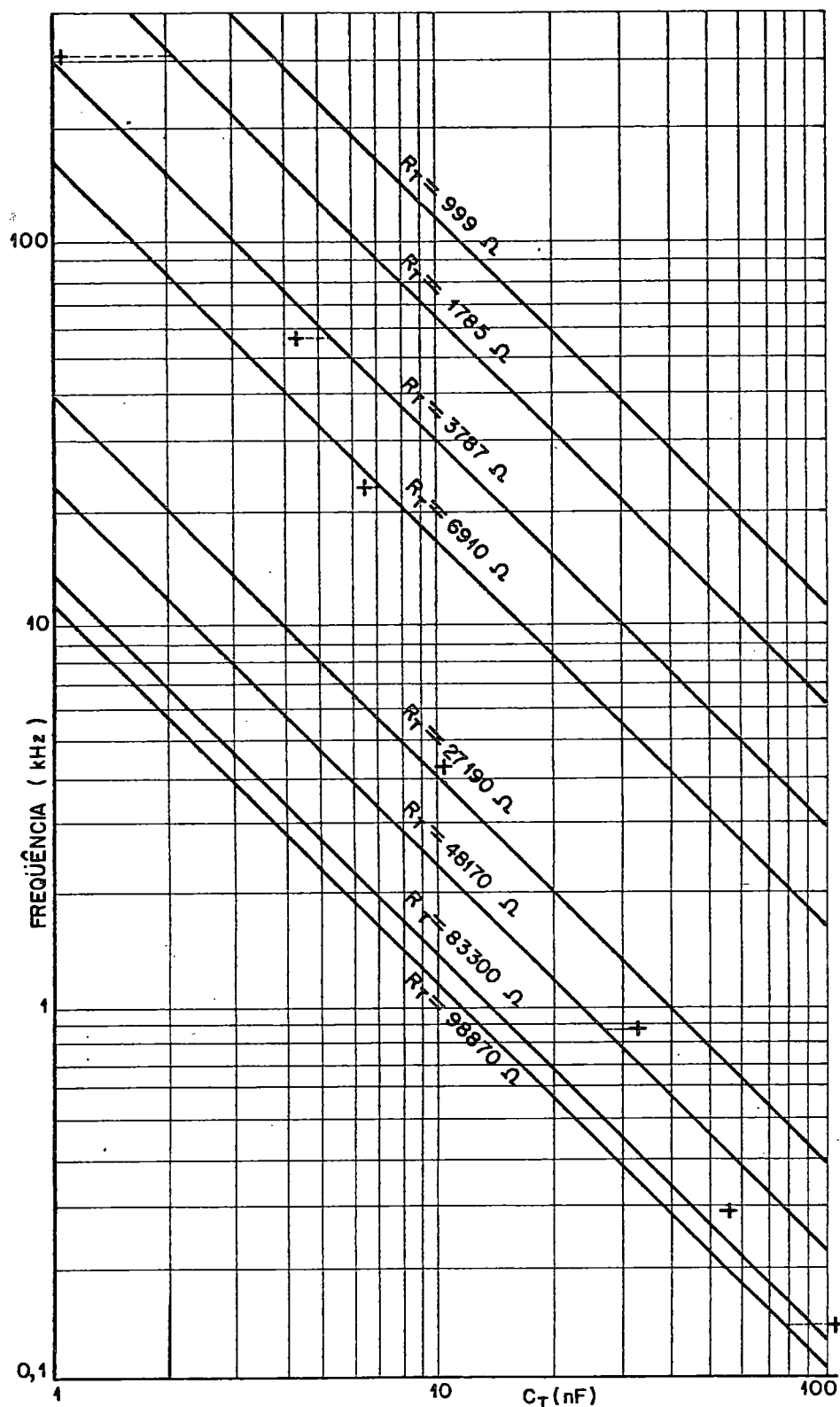


FIG. 3.1. FREQUÊNCIA MEDIDA VESUS  $R_T$  e  $C_T$ . AS RETAS REPRESENTAM A EXPRESSÃO (3.1) PARAMETRIZADA EM  $R_T$ . AS CRUZES REPRESENTAM PONTOS MEDIDOS.

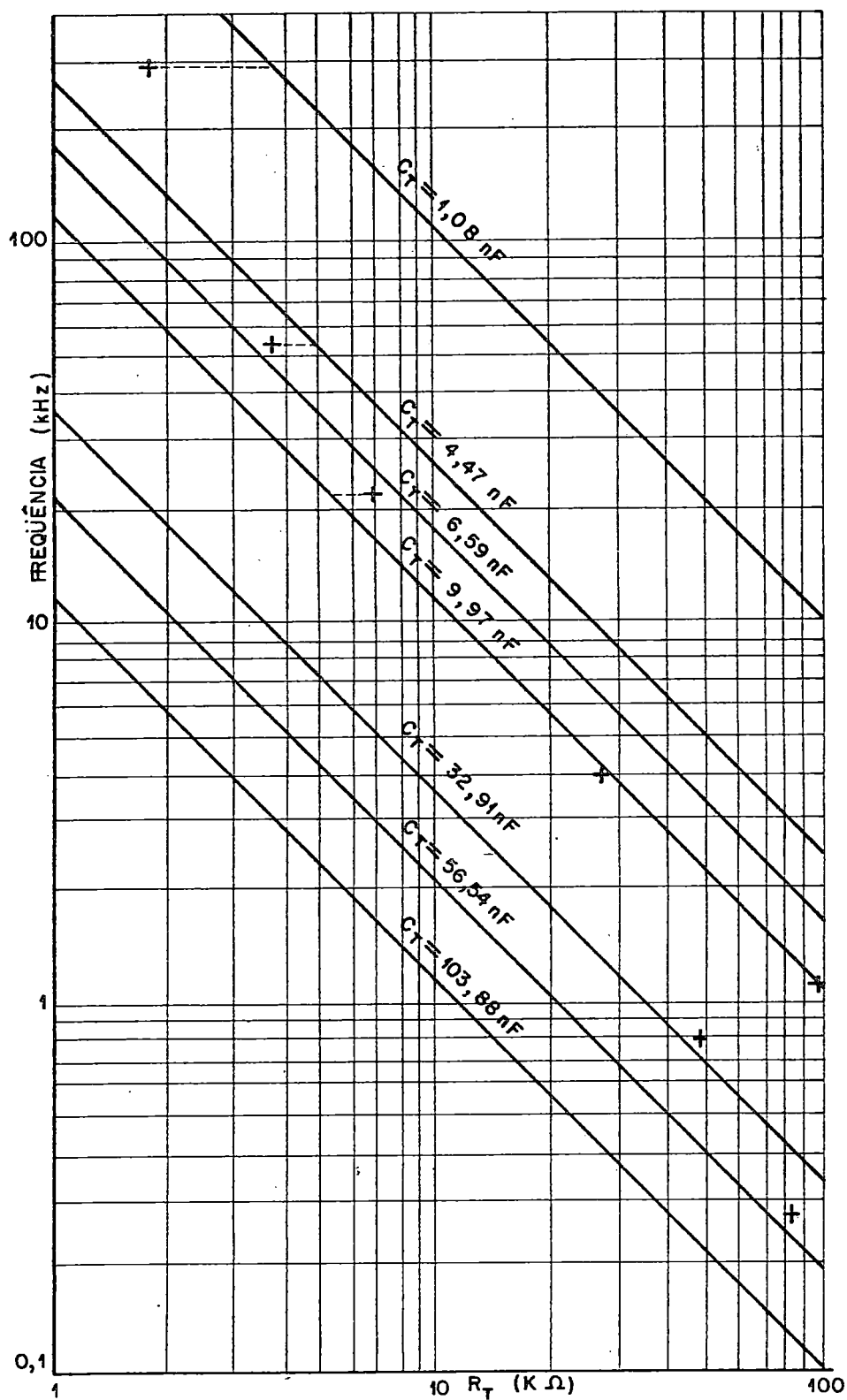


FIG.3.2. FREQUÊNCIA MEDIDA VERSUS  $R_T$  e  $C_T$ . AS RETAS REPRESENTAM A EXPRESSÃO (3.1) PARAMETRIZADA EM  $C_T$ . AS CRUZES REPRESENTAM PONTOS MEDIDOS.

ferenças obtidas via (3.1), mas mesmo assim continuaram insatisfatoriamente altas.

O segundo modelo testado levou em conta a possibilidade de expoentes diferentes da unidade para  $R_T$  e  $C_T$ , mas mantendo lineares (retas) os gráficos parametrizados num papel log-log, uma vez que os gráficos correspondentes fornecidos pelos fabricantes [4] se aproximam muito de retas:

$$f = \frac{k}{R_T^m C_T^n} \quad (3.3)$$

Nesse caso três parâmetros ( $k$ ,  $m$  e  $n$ ) foram obtidos por regressão, mas ainda assim as diferenças mantiveram-se insatisfatoriamente altas. A inadequação desses valores prova duas coisas. Em primeiro lugar as discrepâncias entre valores medidos e previstos não se deve ao espalhamento de parâmetros (apesar das medidas terem sido realizadas com uma única unidade), mas sim aos próprios modelos, caso contrário uma simples mudança no valor dos parâmetros seria suficiente para diminuir significativamente as discrepâncias. Isso ocorreria naturalmente como consequência da aplicação do método dos mínimos quadrados.

Em segundo lugar os gráficos parametrizados em papel bilogarítmo não podem ser exatamente retas. Esse fato, que pode ser constatado por uma análise minuciosa das folhas de dados dos fabricantes, também está implícito no caráter aproximado da expressão (3.1).

A expressão (3.1) é típica de multivibradores astáveis cuja frequência é determinada por uma constante RC. Nes-

ses casos invariavelmente a expressão que se obtém é aproximada (eg. Ref. [ 6 ] ). Uma expressão mais refinada pode ser obtida por regressão, aproximando os pontos medidos de um modelo de segunda ordem que leva em conta o quadrado da constante de tempo. Isso é um trabalho que ainda deverá ser feito e descrito num dos relatórios subsequentes sobre o 3524. Também estão previstas medidas mais cuidadosas de frequência.

### 3.3. Comportamento e Parâmetros Observados nos Sinais do Oscilador

#### 3.3.1. Fase Relativa Entre os Pulsos e as Rampas

Para todos os valores de  $R_T$  e  $C_T$ , foi observado que, quando a forma de onda retangular (pulsos) iniciava uma transição positiva (passando do nível baixo para o nível alto), a onda dente-de-serra iniciava uma transição negativa (passando do nível alto para o nível baixo). Isso pode ser visto na Fig.3.3.

#### 3.3.2. Amplitudes

Para todos os valores de  $R_T$  e  $C_T$  utilizados, a amplitude do pulso da onda retangular manteve-se constante no valor 2,0 V (nível baixo 0V e nível alto 2,0 V). Para a onda dente-de-serra manteve-se a rampa positiva de 0 V (nível baixo) a 1,9 V (nível alto), para todos os valores de  $R_T$  e  $C_T$  utilizados.

Pelo menos para alguns valores de frequência, uma variação da tensão de entrada de 8,0 a 34,0 V não provocou ne-

nhuma mudança no valor das amplitudes das ondas de saída (Figura 3.3), dentro dos limites de observação permitidos pela instrumentação empregada.

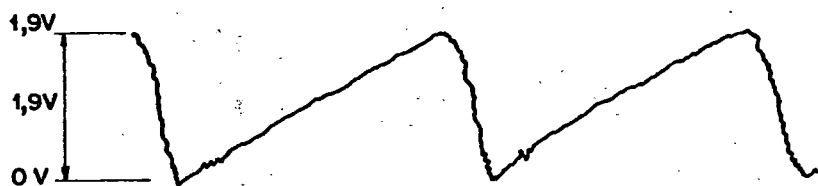
### 3.3.3. Comportamento da Forma-de-Onda com a Frequência

Para frequências altas, foram observadas distorções nas formas-de-onda, que podem ser vistas na Fig.3.3, ao lado das formas-de-ondas normais, para frequências baixas. Essas distorções começaram a ser mais perceptíveis acima de 50 kHz.

### 3.3.4. Ciclo de Trabalho

Para verificar o comportamento do ciclo de trabalho (duração do pulso em relação ao período) em função da constante de tempo, a resistência externa foi fixada enquanto variou-se a capacitância externa. Para frequências baixas, essa medida não foi possível, pois para períodos muito grandes em comparação com a largura do pulso, o instrumento (osciloscópio) não possibilitou a leitura. Para altas frequências, onde o período da onda era pequeno, e a medida possível, a largura do pulso permaneceu em uma faixa de  $0,5 \mu s$  a  $2,0 \mu s$ . Esse ciclo de trabalho é o ciclo do oscilador, que não deve ser confundido com o ciclo de trabalho dos transistores de passagem, o qual depende da saída do amplificador de erro.

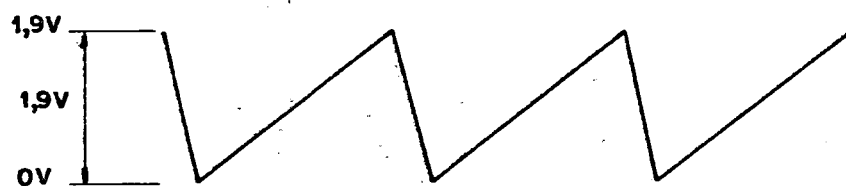
Medidas adicionais estão previstas e deverão ser relatadas esclarecendo melhor a relação entre o ciclo de trabalho do oscilador, que está diretamente relacionado com o "tempo morto" dos transistores de saída, e a constante de tempo  $R_T C_T$ .



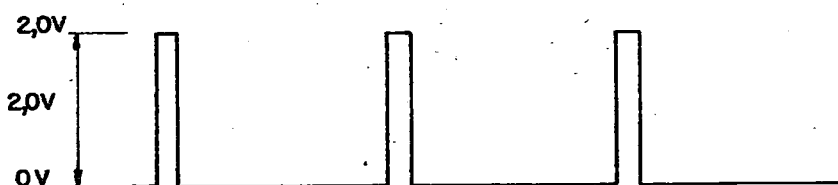
a) FORMA DE ONDA NO PINO 7



b) FORMA DE ONDA NO PINO 3



c) FORMA DE ONDA NO PINO 7



d) FORMA DE ONDA NO PINO 3

FIGURA 3.3. FORMAS DE ONDA DE SAÍDA DO OSCILADOR

(a) e (b) — FREQUÊNCIAS ALTAS

(c) e (d) — FREQUÊNCIAS BAXAS

### 3.3.5. Comportamento da Frequência em Função da Alimentação

Para uma variação da tensão de entrada de 8,0 a 34,0 V, a frequência do oscilador não sofreu alteração observável no instrumento de medida (osciloscópio).

### 3.3.6. O Comportamento do Oscilador para Componentes Externos fora da Faixa Recomendada

Foram utilizados, na experiência, alguns valores de resistência  $R_T$  e capacitância  $C_T$  fora da faixa especificada pelo fabricante (no caso,  $R_T = 0,997 \text{ k}\Omega$ ,  $R_T = 222,9 \text{ k}\Omega$  e  $C_T = 0,2154 \text{ }\mu\text{F}$ ). O oscilador, com esses valores, funcionou normalmente, com a ressalva de apresentar distorção nas formas de onda para altas frequências, e a frequência calculada pela expressão (3.1) apresentar uma grande diferença do valor experimental para valores muito distantes da faixa de 1 kHz.

## 4. Uma Análise Crítica dos Resultados

A correta avaliação dos resultados colhidos deve ser feita tendo em mente o objetivo central do trabalho principal, do qual esse relatório é parte. Esse objetivo central é um modelamento (do controlador tipo 3524) mais detalhado do que permitem os dados obtidos na literatura disponível. Sob esse ponto de vista o presente relatório não é completo em relação à parte a qual está dedicado, apesar de avançar o assunto. Uma crítica construtiva pode ser resumida em dois pontos principais. Em primeiro lugar os dados levantados provêm pre-

dominantemente de uma única amostra do 3524 e portanto contém pouca informação estatística. Devem ser considerados meramente como típicos até que mais dados de conjunto sejam obtidos. Uma visão estatística do circuito em questão é imprescindível para projetos de aplicação criteriosos, como os que planejamos levar avante num futuro próximo.

Os custos e dificuldades de obtenção de estatísticas com equipamento limitado são reconhecidamente altos, mas uma tentativa deve sempre ser feita, ainda que sirva somente para delinear melhor o conjunto de dúvidas a ser realimentado ao fabricante.

Em segundo lugar, várias características e parâmetros relevantes não puderam ser medidos, ou não puderam ser medidos com a precisão desejável. Essas características e parâmetros são arrolados no Apêndice A e deverão ser motivo de medidas adicionais a serem descritas num dos relatórios subsequentes. Lacunas particularmente importantes são a regulação de carga do regulador de referência, a dependência da frequência do oscilador da temperatura ambiente, a máxima frequência utilizável e o desempenho do oscilador funcionando no modo síncrono.

## APÊNDICE A

### UMA PREVISÃO DE TRABALHO ADICIONAL

#### A.1. Regulador Interno - Dados ainda por obter

Em relação ao regulador de referência as seguintes características (nem todas são características dinâmicas) deverão ser objeto de futuras medidas.

Resistência ou Impedância de Saída - Um gráfico estático registrando tensão de saída versus corrente de saída para diferentes valores de tensão de entrada.

Comportamento da Saída com Entrada Superior a 36 V- Entrada pode atingir 40 A, mas nesta etapa preliminar as medidas foram realizadas com  $V_{CC} \leq 36$  V.

Regulação de Saída ou de Carga - Não foi medida apesar de especificada pelo fabricante, cf.Ref. [ 4 ], pg.114.

Rejeição de Flutuação - É normalmente especificada para 120 Hz, mas não foi medida. Seria interessante medi-la continuamente numa ampla faixa iniciando um pouco abaixo de 50 Hz e terminando um pouco acima de 800 Hz. Com isso teríamos dados para qualquer situação incluindo desde alimentação com 50 Hz até alimentação em frequência de aviação, prevendo também retificação de meia onda e desvios nas frequências nominais.

Coeficiente de Temperatura - O comportamento da tensão de referência com a temperatura ambiente é descrito pelo fabricante, e equivale tipicamente a uns 40 ppm/°C para os dispositivos 2524 e 3524. Seria interessante ter uma idéia do comportamento estatístico desse parâmetro, bem como da respos

ta dinâmica em temperatura da tensão de referência.

Resposta a Degrau - A resposta a degrau de um sistema contém muita informação compactada sobre seu comportamento dinâmico. Essas informações, no entanto, só podem ser recuperadas se tanto os sinais de entrada como os de saída forem registrados com fidelidade, o que não é o caso das medidas descritas neste relatório. Seria importante registrar a resposta a degrau para diferentes cargas e diferentes amplitudes. Diferentes amplitudes poderiam revelar os limites da linearidade do regulador de referência. A aplicação de diferentes tempos de subida é útil para determinar a partir de que valor o tempo de subida (ou descida) da entrada pode ser desprezado. Essas medidas estão entre as mais importantes e certamente o concurso de um bom gerador de funções juntamente com algum recurso para registrar os sinais constituem a solução ideal.

Eficiência - Como o controlador destina-se em princípio à aplicações de alta eficiência, seria interessante determinar a eficiência do regulador de referência com diferentes cargas e gerar um gráfico mostrando eficiência versus corrente de carga.

Corrente de Entrada - A corrente de entrada do regulador é de alto interesse para dimensionar o circuito ou circuitos que o precedem: filtro, retificador, transformador.

## A.2. Oscilador Interno - Dados ainda por Obter

Os seguintes pontos devem ser objeto de medidas mais detalhadas para que o comportamento estático e dinâmico do oscilador interno fique melhor caracterizado:

Frequência em Função de  $C_I$  e  $R_I$  - O número de pontos medidos para caracterizar a frequência em função da resistência e da capacitância externas é pequeno demais. É necessário um maior número de medidas tanto com  $R_I$  fixo e  $C_I$  variável como com  $C_I$  fixo e  $R_I$  variável. Isso permitiria estabelecer não só gráficos parametrizados mais realísticos, como expressões melhores para a frequência.

Frequência versus Temperatura - O comportamento da frequência com a temperatura ambiente não foi determinado. Em quaisquer medidas nesse sentido é necessário distinguir a influência do capacitor externo e a influência do próprio dispositivo 3524. O ideal seria isolar cada uma deles alternadamente. É desejável também conhecer o comportamento dinâmico da frequência em função da temperatura.

Frequência versus Alimentação - Medidas estáticas foram realizadas com a alimentação variando de +8 V até +34 V sem modificação perceptível na frequência. Medidas dinâmicas (resposta a degrau por exemplo) não foram efetuadas. A importância destas é óbvia. Também de interesse é o comportamento da frequência quando alimentação regulada externa for empregada.

Fase Relativa Entre os Pulsos e as Rampas - Medidas de precisão em diferentes frequências ajudariam na compreensão geral do funcionamento do 3524.

Frequência versus Carga do Oscilador - O desempenho do oscilador com diferentes cargas na saída deste (pino 3).

Ciclo de Trabalho ou Tempo Morto - O ciclo de trabalho do oscilador em função da capacitância externa é indiretamente fornecido pelo fabricante (cf. Ref. [ 4 ], pg.117) através do "tempo morto", que é o intervalo durante o qual ambos transistores de saída estão cortados. Essa situação é imposta para que não ocorra condução simultânea durante a transição de estado. Os dados obtidos até agora são exíguos, justificando sua extensão.

Operação no Modo Síncrono - Nenhuma medida foi realizada empregando um oscilador externo. A importância desse modo de operação reside na sua influência sobre a máxima frequência utilizável e na possibilidade de vários controladores funcionarem na mesma frequência. Uma experiência interessante seria analisar o grau de sincronismo do chaveamento dos transistores de diversos controladores operando com a mesma frequência externa, realimentados com a mesma variável a ser controlada e alimentados com a mesma tensão de referência.

Máxima Frequência Utilizável - A máxima frequência utilizável depende não apenas do oscilador, mas também do comportamento dinâmico dos transistores de saída. A avaliação dessa frequência por sua vez exige que os sinais PWM sejam extraídos do 3524 (através dos transistores), uma vez que não são acessíveis diretamente. Medidas nesse sentido serão realizadas quando da análise dinâmica dos transistores e deverão constar pelo menos do relatório final. Uma possibilidade adicional é, através de um circuito com entrada Schmitt ( inversor CMOS por exemplo), regenerar o sinal PWM deteriorado presente na saída de um dos transistores e acionar um dispositi

vo de potência externo (por exemplo MOSFET de potência). Esse caminho será eventualmente explorado.

## APÊNDICE B

## COMENTÁRIOS E PROPOSTAS PARA MELHORAR A INSTRUMENTAÇÃO

Muitos dos parâmetros medidos ou ainda por medir em conexão com o controlador 3524 são medidos rotineiramente pe los fabricantes através de procedimentos já consagrados. Os autores têm consciência de que sob vários aspectos o trabalho de caracterização de um circuito como o 3524 representa a penas uma iniciação à ciência, com muito pouca inovação. Parte das informações que buscamos certamente já estão publica das sob alguma forma. Outra parte pode sem dúvida, ser obtida diretamente dos fabricantes.

Um de nossos objetivos é, no entanto, dominar aqui em São Carlos, determinados procedimentos, tentando identificar e superar todas as dificuldades tecnológicas envolvidas. Trata-se de uma tentativa de absorver "know-how".

- Dentro dessa perspectiva é importante elaborar uma análise crítica da instrumentação eletrônica empregada. Essa análise interessa não só para formar uma imagem clara do que permitiria hoje o estado-da-arte, (e dessa forma combater a obsolescência), como também para identificar lacunas que ainda existem no Departamento de Eletricidade da EESC, criando ao mesmo tempo e de uma forma racional, subsídios para o preenchimento dessas lacunas quando a oportunidade surgir. Consideramos fundamental saber em que direção orientar futuras aquisições, ou mesmo em que direção orientar o desenvolvimento local de instrumentação pertinente.

A instrumentação disponível nos laboratórios do Departamento de Eletricidade para realizar as medidas relatadas

neste documento é bastante pobre. Não dispomos de um contador de frequências e as medidas nesse sentido foram feitas por inversão de período medido em osciloscópio. Os três osciloscópios de boa qualidade existentes no Departamento estão fora de operação há algum tempo exigindo reparos, o que nos obrigou a empregar um osciloscópio com maior incerteza na escala de tempo.

As fontes DC reguladas disponíveis não são muito limpas em termos de flutuação. Além disso, mesmo empregando duas delas em série não foi possível alimentar o 3524 com mais de 34 Volts.

O gerador de função e o osciloscópio empregados não permitiram boa resolução na avaliação de resposta a degrau.

Os componentes passivos, particularmente os capacitores foram medidos com uma ponte do Departamento de Física e Ciência dos Materiais do IFQSC porque o Departamento de Electricidade só dispõe de duas pontes muito antigas, não calibradas há muito tempo, com uma incerteza nominal alta, além de pouco práticas para operar.

Desses fatos ficou claro que, as medidas realizadas seriam mais fáceis - dando margem para que os autores se voltassem para questões mais científicas - se, fossem disponíveis um gerador de onda quadrada rápido; uma fonte de alimentação de baixa flutuação, para algumas dezenas de Volts; um osciloscópio de boa resolução horizontal; uma ponte moderna para medir capacitâncias com pequena incerteza; um multímetro para medir resistências com pequena incerteza e finalmente um contador de frequências de boa qualidade.

Com base nesses requisitos, a seguinte lista de instrumentos é incluída como uma proposta do "estado-de-arte" (cf. Ref. [ 2 ] e Ref. [ 3 ] ):

- 1) Gerador de Funções - Hewlett-Packard modelo HP 8116A (Pulse/Function Generator).

Características principais: onda quadrada com 32 V e nível DC até  $\pm 7,95$  V; tempo de transição menor que 6 ns; frequências desde 1 mHz até 50 MHz. Compatível com a interface padrão IEEE-488.

- 2) Fonte de Alimentação - Hewlett-Packard modelo HP 6002A (DC Power Supply).

Características Principais: Limites de tensão, corrente e potência, respectivamente 50 V, 10 A e 200 W. Regulação de carga igual a 0,01 % + 1 mV; flutuação mais ruído, no máximo igual a 1 mV rms. Compatível com a interface padrão IEEE-488.

- 3) Osciloscópio - Philips modelo PM 3315 (Digital Storage Oscilloscope).

Características principais: faixa de frequência utilizável de 60 MHz; tempo de subida de 23 ns; coeficiente de deflexão até 10 mV/div. Capacidade para armazenar eventos isolados com largura de faixa equivalente de até 12,5 MHz. Compatível com a interface padrão IEEE-488.

- 4) Ponte RLC - Hewlett-Packard modelo HP 4262A (LCR Meter).

Características principais: nível DC interno; incerteza de

0,2 %; frequências de testes até 10 kHz. Medidas de C e L com resistências parasitas. Faixas desde 10 pF até 10 mF; 10  $\mu$  H até 1000 H. Compatível com a interface padrão IEEE-488.

5) Multímetro - Hewlett-Packard modelo HP 3478A (Multimeter).

Características principais: resolução de 100 nV; Faixas de medidas de resistências desde 30  $\Omega$  até 30 M $\Omega$ . Medidas de rms verdadeiro até 300 kHz para tensões e 20 kHz para correntes. Calibração eletrônica. Compatível com a interface padrão IEEE-488.

6) Contador de Frequências - Hewlett-Packard modelo HP 5384 (Frequency Counter).

Características principais: faixa de 10 Hz a 100 MHz; sensibilidade melhor que 45 mV; largura de pulso mínima de 5 ns. Compatível com a interface IEEE-488.

Todos os instrumentos listados são compatíveis com a interface IEEE-488 de modo a permitir no caso dessas aquisições serem um dia realizadas, a montagem de um laboratório moderno, flexível e extremamente produtivo.

## REFERÊNCIAS

- [ 1 ] - ADAMIAN, A. - Voltage Regulator Handbook. Mountain View, CA, EUA, Fairchild, 1978.
- [ 2 ] - HEWLETT-PACKARD CO. - 1986 Measurement, Computation and Systems Catalog. Palo Alto, CA, EUA, Hewlett-Packard 1986, 808 pp.
- [ 3 ] - PHILIPS GLOEILAMPENFABRIEKEN - Test and Measurement Catalog 1985/86. Heindhoven, Holanda, 1985.
- [ 4 ] - SPENCER, J.D. & PIPPENGER, D.E. - The Voltage Regulator Handbook. Dallas, TX, EUA, Texas Instruments, 1977, 196 pp.
- [ 5 ] - TEXAS INSTRUMENTS INC. - Applied Statistics. Dallas, TX, EUA, Texas Instruments, 1977.
- [ 6 ] - TIETZE, U. & SCHENK, Ch. - Advanced Electronic Circuits. Berlin, Springer, 1978, 510 pp.
- [ 7 ] - FRAGNITO, C.R. & MASS, B.J. - Desempenho Dinâmico de um Regulador de Tensão Monolítico PWM da Classe 3524. São Carlos, SP, Depto. de Eletricidade, EESC, USP. Relatório de Monitoria 001/86 CRF/MON. Abril de 1986, 28 pp.