

## **5**

### **Medições e Resultados Obtidos**

#### **5.1.**

##### **Introdução**

Ao longo do presente capítulo serão apresentadas as técnicas de medição de ruído de fase e os resultados obtidos na medição dos osciladores desenvolvidos e ou testados no CETUC.

#### **5.2.**

##### **Utilização de Misturadores**

Ao longo da presente dissertação foram realizados osciladores para aplicações em telecomunicações objetivando características de ruído de fase superior a 90 dBc a 10 kHz da portadora nas frequências de 1,88, 1,96 e 10,2 GHz. Estes dispositivos poderiam ser caracterizados de forma imprecisa utilizando-se um analisador de espectro de microondas. Entretanto, as técnicas de projeto utilizadas poderiam produzir resultados significativamente superiores a 100 dBc/Hz à 3,25 kHz da portadora. Considerou-se então oportuno desenvolver-se uma sistemática de medição precisa do ruído de fase, a qual será descrita a seguir.

A visualização e medição do ruído de fase, de osciladores que apresentam desempenho otimizado é limitada quando um analisador de espectro é utilizado, pois nestas aplicações, o ruído de fase devido ao oscilador local desse equipamento é bastante elevado e inviabiliza sua utilização.

Uma alternativa técnica para este procedimento consiste no batimento de dois osciladores idênticos através de um misturador e avaliação do sinal resultante na faixa de FI (frequência intermediária formada pela diferença dois sinais envolvidos). Utilizam-se valores de frequência intermediária inferiores a 100 kHz e um analisador de espectro neste domínio de frequência.

Misturadores são dispositivos não lineares utilizados para converter flutuações de frequência em flutuações de tensão.

Este dispositivo consiste de três portas denominadas porta local, porta sinal e porta intermediária que devem ser utilizadas para combinar os sinais de uma fonte local com um sinal a ser processado na saída intermediária.

Sua configuração interna é constituída de uma estrutura de acoplamento entre as portas local e sinal a um arranjo de diodos que deverão operar como elementos não lineares. A saída intermediária possibilita a retirada das frequências soma ou diferença de acordo com a funcionalidade específica do componente.

O processo de combinação, ou multiplicação, inicia-se através da inserção dos sinais nas portas local e sinal do misturador. Os sinais estão exemplificados abaixo pelo sinais a e b [15, 16]:

$$a = A \text{ sen}(w_1 t + \phi_1)$$

$$b = B \text{ sen}(w_2 t + \phi_2)$$

O resultado desta multiplicação resulta em:

$$ab = AB \text{ sen}(w_1 t + \phi_1) \text{ sen}(w_2 t + \phi_2)$$

$$ab = -\frac{AB}{2} [\cos((w_1 + w_2)t + (\phi_1 + \phi_2)) - \cos((w_1 - w_2)t - (\phi_1 - \phi_2))] ]$$

Configurando então as frequências de conversão:

$$f_{UPCONV} = \cos((w_1 + w_2)t + (\phi_1 + \phi_2))$$

$$f_{DOWNCONV} = \cos((w_1 - w_2)t - (\phi_1 - \phi_2))$$

O arranjo e o número de diodos utilizados relacionam-se com os níveis de potencia dos sinais considerados. O principal parâmetro de um misturador é a sua perda de conversão expressa por:

$$L_{conv} = \frac{\text{Potência do Sinal Convertido na Porta Intermediária (FI)}}{\text{Potência do Sinal na Porta Sinal}} \quad (5.1)$$

De acordo com a descrição anterior, o misturador é utilizado para converter as flutuações de fase em flutuações de tensão. Quando dois sinais de frequência  $f_0$  são injetados, são geradas harmônicas referentes a diferença e a soma dos mesmos. Se os sinais estão em quadratura a diferença será 0 Hz com uma saída

média de 0 V. O sinal de frequência  $2f_0$  geralmente é filtrado com um filtro passa baixa.

A Figura 5.1 mostra o esquema e a Tabela 5.1 as especificações do misturador fabricado pela “Marki microwave” utilizado nos testes de medida de ruído de fase. O procedimento de conversão de frequências para a FI é usualmente denominado de “batimento”.

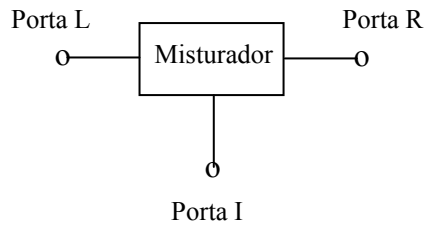


Figura 5.1. Diagrama esquemático do misturador.

		Potência de Entrada	Saída na porta	Resposta em frequência do Sinal
PORTAS	L	7 a 10 dBm	IF	Subtração + soma $\cos((\omega_1 - \omega_2)t - (\phi_1 - \phi_2)) - \cos((\omega_1 + \omega_2)t + (\phi_1 + \phi_2))$
	R	2 dBm	RF	Soma $\cos((\omega_1 + \omega_2)t + (\phi_1 + \phi_2))$
	I	-4 a -12 dBm	LO	Subtração $\cos((\omega_1 - \omega_2)t - (\phi_1 - \phi_2))$

Tabela 5.1. Especificações do misturador.

### 5.3. Descrição do Método de Medição

Uma das formas mais precisas de medir-se o ruído de fase de osciladores é através do método do detector de fase. Para utilizar-se este método serão necessários pelo menos dois osciladores estáveis.

Entretanto, em aplicações dedicadas, como a frequência intermediária de interesse é de 3,25 kHz, o batimento de dois osciladores operando em 10 GHz produzirá uma frequência intermediária instável, variando de 10 kHz à 50 kHz.

Para evitar a realização de uma medição extremamente instável, utilizou-se o método de sincronização de frequências (*Injection Locking*) entre os osciladores.

A sincronização de frequências é um interessante e útil fenômeno universalmente observado em todos os tipos de osciladores físicos. O termo refere-se ao fato que sob certas condições, quando um oscilador é perturbado por um sinal fraco e próximo à sua frequência natural, suas frequências e flutuações tornam-se idênticas.

Para execução desta técnica, os osciladores deverão estar com frequências bem próximas, segundo explicado na referência [17], de acordo com a Equação (5.2).

$$\Delta\omega_m = \frac{\omega_0}{Q_{ext}} \sqrt{\frac{P_i}{P_0}} \quad (5.2)$$

Para os osciladores utilizados, com níveis de potência de +30 dBm e -15 dBm aproximadamente, obteve-se  $\Delta f \approx 15$  kHz. A figura abaixo ilustra o método descrito.

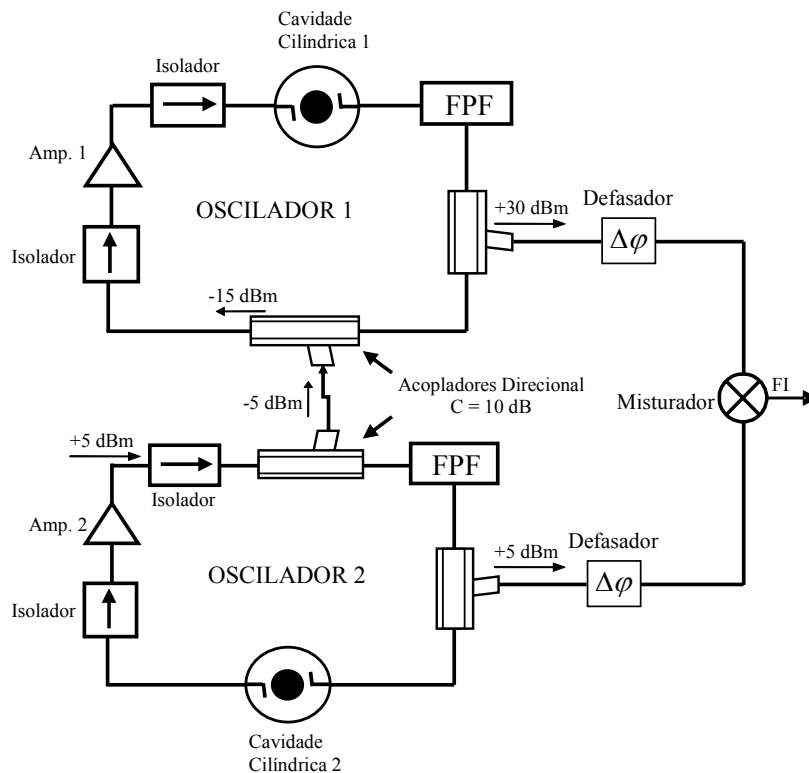


Figura 5.2. Configuração sugerida para sincronização entre osciladores em torno de 10 GHz com  $\Delta f \approx 15$  kHz, segundo os níveis de potência indicados. (C=Fator de acoplamento).

No trabalho desenvolvido utilizou-se um oscilador implementado por um amplificador Miteq e um segundo modelo implementado através de um amplificador de potência de baixo custo. A sincronização apresentou-se difícil com a faixa de frequência intermediária deslocando-se de 3 kHz até 50 kHz. As frequências foram aproximadas sintonizando-se as cavidades dielétricas das malhas.

Situação idêntica ocorreu quando novos osciladores desenvolvidos no INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) foram medidos no laboratório do CETUC (Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC/RJ).

Uma nova medição foi realizada nos laboratórios do INPE implementando-se uma cuidadosa malha de sincronização descrita pela Figura 5.3.

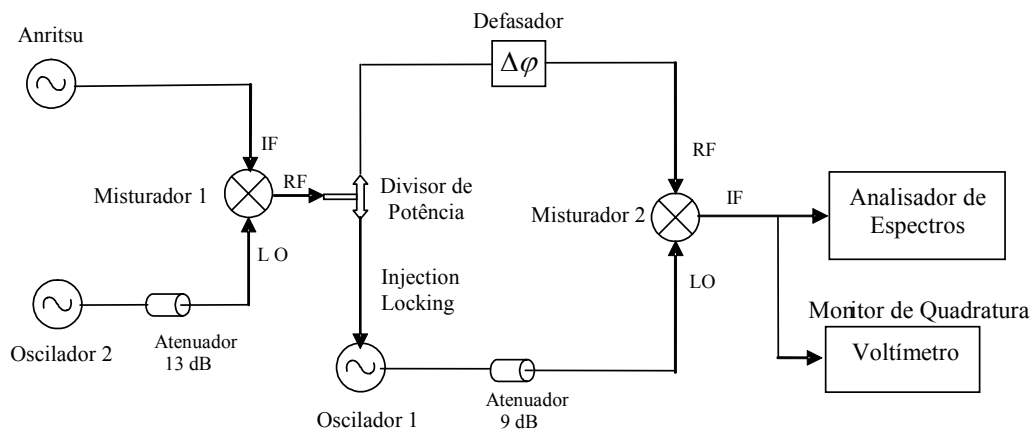


Figura 5.3. Diagrama esquemático do método de detector de fase utilizado na primeira tentativa de medição do ruído de fase dos osciladores.

O primeiro batimento entre o oscilador 2 e o gerador Anritsu (ruído de fase inferior a -140 dBm) foi realizado para acomodar as diferenças de frequência entre os osciladores 1 e 2 da ordem de 40 MHz.

Nesta etapa, o analisador de baixa frequência pôde avaliar uma frequência intermediária de 3,25 kHz com grande estabilidade.

O método do detector de fase utiliza um misturador para converter as flutuações de fase em flutuações de tensão. Se os sinais dos osciladores estiverem em quadratura (defasados de  $90^{\circ}$ ), a diferença apresentará uma saída média de 0 V e flutuações proporcionais ao ruído de fase de ambas as fontes [17].

A Figura 5.4 apresenta o diagrama de medição realizado assumindo-se que os osciladores estão sincronizados.

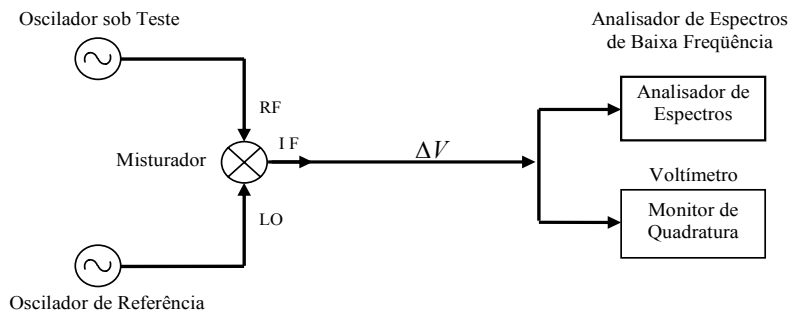


Figura 5.4. Diagrama esquemático do método de detector de fase utilizado na medição do ruído de fase dos osciladores sincronizados em 10 GHz..

#### 5.4. Resultados obtidos

Os osciladores com ruído de fase reduzido apresentaram em todas as aplicações um desempenho de ruído de fase superior às apresentadas pelos analisadores de espectro de microondas. Resumidamente pode-se indicar:

$f_0$ (GHz)	Potência de Saída (dBm)	L (dBc/Hz@10kHz)
1,88	18	$\leq -90$
1,96	18	$\leq -90$

Ou seja, os osciladores desenvolvidos em  $f_0 = 1,88$  GHz e  $f_0 = 1,96$  GHz apresentaram a mesma potência de saída  $P_0 = +18$  dBm e ruído de fase a 10 kHz da portadora de  $L \leq 90$  dBc/Hz@10kHz.

Dois osciladores desenvolvidos no CETUC na frequência em torno de 10 GHz tiveram suas cavidades dielétricas ajustadas para manterem-se com frequências próximas e inferiores ao intervalo de captura de 15 kHz. Além deste procedimento, utilizaram-se as manobras de sincronização indicadas na Figura 5.2. Estes dispositivos utilizaram o método de detecção de fase para sua caracterização.

O resultado obtido nesta etapa pode ser resumido como:

$f_0$ (GHz)	Potência de Saída (dBm)	L (dBc/Hz@3,25kHz)
10,2	15 dbm	-102
10,2	15 dBm	-102

A potência de saída foi de 15 dBm para ambos os osciladores e o ruído de fase à 3,25 kHz da portadora  $L = -102 \text{ dBc/Hz @ } 3,25\text{kHz}$ .

Deve ser destacado que estas medições apresentaram frequência de FI variável, apesar dos procedimentos acima destacados.

Três osciladores desenvolvidos no INPE, em frequências em torno de 10 GHz, foram também testados nos laboratórios do CETUC utilizando o método de detecção de fase através de batimentos dois a dois. Estes apresentaram resultados e problemas de instabilidade de medição semelhantes aos descritos imediatamente acima.

O sistema proposto na Figura 5.3 permitiu então que o método de detecção de fase fosse implementado nos laboratórios do INPE utilizando osciladores em torno de 10 GHz apresentando estabilidade na frequência de FI. Para potências de saída em torno de 20 dBm foram caracterizados osciladores com ruído de fase de em torno de  $-108 \text{ dBc/Hz @ } 3,25\text{kHz}$ .

## **5.5. Comentários e Conclusões Finais**

Neste capítulo foram apresentados as técnicas de medidas empregadas nesta dissertação e os resultados das medidas realizadas.

Osciladores foram caracterizados utilizando-se um analisador de espectro de microondas. Para observação mais detalhada do modelo teórico analisado, utilizou-se o método de detector de fase obtendo-se resultados da ordem de  $-100 \text{ dBc/Hz@}3,25 \text{ kHz}$ .

As medições atingiram a estabilidade necessária quando procedimentos de sincronização foram cuidadosamente executados.