# 2.Gerador Óptico

O oscilador óptico ou circuito tanque (oscilador), constitui a parte responsável pela geração de pulsos curtos. A idéia do uso de dispositivo que operasse no domínio óptico permite alcançar freqüências de microondas elevadas, as quais eletronicamente têm limitações e não seriam possíveis, além do que interferências eletromagnéticas e blindagens não são necessárias para proteção e funcionamento.

No processo da geração dos pulsos é importante observar fatores como a dispersão da velocidade de grupo, auto modulação de fase e a equação não linear de Schrödinger responsável pelo comportamento físico matemático na propagação do pulso.

# 2.1.1.Dispersão da Velocidade de Grupo

Este efeito esta relacionado com a freqüência, na qual o pulso é alargado dado que as diversas componentes espectrais sofrem espaçamento durante a transmissão. A velocidade de grupo é definida pela relação:

$$v_g = \frac{\partial}{\partial \beta} \,\omega \tag{2.1}$$

De maneira que  $\omega$  representa a freqüência óptica e  $\beta = \frac{n\omega}{c}$ ,  $v_{g=}\frac{c}{n_g}$ , de modo

que o denominador representa o índice de refração da velocidade de grupo.

$$n_g = n + \omega \frac{\partial n}{\partial \omega} \tag{2.2}$$

O alargamento espectral do pulso provocado pela GVD é definido por:

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta \omega = L \frac{d}{d\omega} \left( \frac{1}{v_g} \right) = L \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} \Delta \omega = L \beta_2 \Delta \omega$$
(2.3)

O fator  $\beta_2 = \frac{d^2}{d\omega^2}$  é a dispersão da velocidade de grupo, o qual indica o

quando um pulso sofre alargamento durante a transmissão.

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda} e \Delta \omega = \left(-\frac{2\pi c}{\lambda^2}\right) \Delta \lambda$$
(2.4)

Combinando as equações 2.3 e 2.4 tem-se a expressão para a dispersão com unidades em  $\frac{ps}{Km*nm}$ .  $D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_{s}}\right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^{2}} \beta_{2}$ (2.5)

Como a dispersão do guia de onda é muito baixa na contribuição da dispersão total, esta será desprezada para efeito de cálculos futuros.

#### 2.1.2. Auto Modulação de Fase

O índice de refração esta relacionado diretamente com a intensidade da potência luminosa do feixe se propagando pela fibra, isso faz com que a medida que potência óptica seja elevada o sinal na fibra sofra alteração descrito por:

$$\mathbf{n}(\boldsymbol{\omega}, |E|^2) = \mathbf{n}(\boldsymbol{\omega}) + n_{nl}E^2$$
(2.2.1)

Desse modo a fase do campo óptico, a qual esta relacionada com o índice de refração não linear, sofrerá alteração em função da intensidade de potência óptica. Essa alteração é denominada auto modulação de fase a qual tem a capacidade de criar novas freqüências ópticas variantes com o campo. A variação de fase em relação ao índice de refração não linear é descrita por três componentes, coeficiente não linear , potência do sinal e comprimento efetivo conforme indica a equação 2.2.2 abaixo.

 $\phi_{nl} = \gamma P_o L_{eff} \tag{2.2.2}$ 

O efeito da auto modulação pode impor um chirp positivo ao pulso de acordo a intensidade de campo. De modo que na região de dispersão normal, freqüências menores se propagam mais rapidamente ao passo das menores são mais lentas, consoante o efeito da GVD produz um pulso que alarga-se-á durante a propagação na fibra dado que as novas freqüências foram geradas pela SPM .O inverso ocorrerá quando a região de dispersão for anômala, de modo que as freqüências mais baixas se propagam de modo mais lentamente e as freqüências superiores se propagam mais rapidamente de modo que o nova combinação GVD

e SPM, pode-se ter a compressão de pulsos. Ou seja o *o chirp*(gorgeio) antes produzido pela SPM com a equalização da GVD pode ser cancelado .

#### 2.1.3. Equação Não linear de Schrödinger

A equação 2.3.1 não linear de Schrödinger é responsável por representar matematicamente a descrição do comportamento de um pulso óptico propagante na fibra. A compreensão dos seus termos é importante pois estão relacionados com os efeitos de SPM e GVD . As soluções matemáticas para esta equação fogem o objetivo do trabalho.

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{A}(z, t)\right) + \beta_{1} \left(\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{A}(z, t)\right) + \frac{1}{2} i \left(\frac{\partial^{2}}{\partial t^{2}} \mathbf{A}(z, t)\right) \beta_{2} + \frac{1}{6} \beta_{3} \left(\frac{\partial^{3}}{\partial t^{3}} \mathbf{A}(z, t)\right)$$
$$- i \gamma |\mathbf{A}(z, t)| \mathbf{A}(z, t) - \frac{1}{2} \alpha \mathbf{A}(z, t)$$

(2.3.1)

A(z, t) Expressão para o campo com uma dependência em z,t

- $\beta_1$  Inverso da velocidade de grupo
- $\beta_2$  Constante da GVD
- $\beta_3$  Constante de susceptibilidade
- γ Parâmetro não linear
- α Atenuação da fibra

#### 2.1.4.Mode Locked Fiber Ring Laser

A tradução do termo em inglês MLFRL acima seria laser a fibra em anel de modo travado, o qual tem por finalidade gerar pulsos curtos estáveis. Inicialmente o estudo de mode locking foi realizado por físicos utilizando lasers ruby, He-Ne e YAG sendo posteriormente aplicado a sistemas de comunicações ópticas. Uma importante contribuição científica é [10].

Fundamentalmente o oscilador óptico ou ressonador óptico é basicamente constituído por um conjunto de espelhos com altíssima reflexão e um meio de ganho. A freqüência fundamental de oscilação da cavidade é determinada pela

região em que o ganho do laser é maior do que as perdas do ressonador como indica a figura 3 abaixo. De modo que existem um conjunto de modos do laser que são radiados compreendidos nesta faixa espaçados pela freqüência da cavidade ou tempo de vôo livre.



Figura 3 Oscilador óptico

O sinal na saída do laser será o resultado da combinação exata dos modos com a mesma amplitude e fase, nos casos em que não é possível equalizar o ganho e fase dos modos, flutuações aleatórias e interferência destrutiva serão percebidas, flutuações no tempo e forma do pulso são variações randômicas observadas.

O desenvolvimento através de uma ferramenta matemática para observação e compreenção dos pulsos considerando uma cavidade de 2 espelhos foi implementado.

# 2.1.5.Análise Computacional para um Sistema de Laser em Anel Simples

Para compreender o fenômeno dos pulsos dentro do laser em anel foi desenvolvido analisando no domínio do tempo um programa que representasse as flutuações e a oscilações do sinal na cavidade de dois espelhos servindo como referência para operação do laser em anel. As expressões para os campos elétricos propagantes dentro da cavidade incidente e refletido são :

$$\operatorname{Ai} := A0 \, \mathbf{e}^{\left(\left(0 \, t + k \, x\right) \, I\right)} + CC \tag{2.4.1}$$

$$Ar := A0 e^{((\omega t - kx + \pi)I)} + CC$$
(2.4.2)

Onde os índices i e r indicam os campos incidentes e refletidos pelos espelhos, o resultado da interferência de feixes é:

Interferencia := 
$$A0 (\cos(\omega t + kx) + \sin(\omega t + kx)I) + 2 CC$$
  
+  $A0 (-\cos(-\omega t + kx) + \sin(-\omega t + kx)I)$  (2.4.3)

Como foi comentado anteriormente, existem k modos se propagando inicialmente de modo que existem M osciladores em diferentes fases e freqüências para o ressonador, o conjunto de modos é sintetizado pela expressão:  $modo := 0.5 \ Ao \ e^{((\phi 0 + k \ dphi)I + (\omega 0 + k \ domega)tI)} + cc$  (2.4.4)

A interferência modal na condição para fase e amplitude constante, representa o somatório dos k modos existentes dentro da cavidade. O pacote óptico é resultado do somatório da interferência dos modos.

$$pacote := \left(\sum_{k=-\frac{M}{2}+1/2}^{\frac{M}{2}-1/2} (0.5 Ao e^{((\phi 0 + k \, dphi) \, I + (\omega 0 + k \, domega) \, t \, I)})\right) + cc$$
(2.4.5)

Durante a simulação 4 modos estavam presentes na cavidade a representação gráfica será a figura 4 abaixo:





A descrição no domínio do tempo da interferência modal será um pulso na saída conforme a figura anterior indica, quanto mais modos forem acoplados ou seja, a combinação de amplitude igual e mesma fase dos campos maior será a intensidade do pulso na saída, crescendo com o quadrado e mais curto será sua duração. Desse modo durante os cálculos de simulações a quantidade de modos

alocados, ou seja, o numero de modos travados para geração dos pulsos curtos é fundamental.

Os pulsos ópticos gerados pelo pacote modal são resultado da equação 2.4.5 de acordo com as condições de mesma fase e amplitude do sinal dentro da cavidade.



Figura 5 Pulsos simulados com maior número de modos

Repare que os pulsos formados na simulação da figura 5 estão em fase com o sinal cw da cavidade e apresentam uma amplitude muito maior. Isto indica que para que os modos sejam travados ou locados é necessário que as condições de travemento foram obedecidas.



Figura 6 Travamento dos pulsos simulados

Para o caso de haver a presença de ruído de fase nos modos o sinal resultante no tempo será resultado de uma interferência destrutiva visto que uma das condições para formação do pulso de saída foi violada. O descasamento de fase dos modos dentro da cavidade impede que todos os modos sejam acoplados forçando a cavidade a oscilar em uma freqüência não específica. Na figura 6 foi realizada uma simulação com programa de computador para a hipótese em que há perturbação na fase dos modos, isto implica que pela equações 2.4.4 e 2.4.5 se tenha perda da coerência do sinal o que corresponde analogamente a um mar de vozes falando atravessadamente [11].



Figura 7 Interferência destrutiva resultante do descasamento de fase

Para o caso de uma perturbação na amplitude o comportamento será diferente, dado que flutuações no pulso são percebidas como mostrado na figura 8 e 9. Oscilações de amplitude nos supermodos do modo dominante podem alterar a intensidade do pulso na saída bem como sua duração. Estas flutuações são muito desagradáveis pois também alteram o valor da razão de extinção.



Figura 8

Figura 9

Perturbação da amplitude do pulso

O uso do programa de simulação permitiu que os efeitos de flutuações de amplitude e fase fossem compreendidos para o ressonador óptico.

Um conjunto de dispositivos optoeletrônicos permite o uso da técnica do *mode locking* para geração de pulsos, esta pode ser ativa ou passiva, para o setup experimental optou-se pelo ativa.

#### 2.1.6.Mode locked experimental

A praticidade da implementação do mode locked ativo foi o fator determinante para os testes experimentais para melhor geração de pulsos, de modo que várias configurações foram tomadas para medição. O uso da técnica MLFRL ativo permite um maior controle, ajuste e estabilização dos modos. O trabalho de uma cavidade em anel com a presença de um modulador deve respeitar um conjunto de características as quais são fundamentais para o funcionamento ótimo.

O ajuste do tamanho da cavidade, tempo de voô livre, controle de potência óptica e radiofrequência, frequência de sintonia do sintetizador são os fatores fundamentais na geração dos pulsos curtos uso de lasers a fibra para cavidades em anel têm despertado o interesse da comunidade científica na formulação e estudo de fenômenos ultra-rápidos para sistemas de comunicação fotônicos. [12]

O funcionamento do MLFRL é semelhante ao ressonador óptico descrito anteriormente, ao passo que foi introduzido dentro da cavidade um elemento ativo que resultará na alteração da freqüência de oscilação fundamental para operação em um valor específico. Este dispositivo é um modulador machzender de intensidade, o qual forçará a cavidade a operar em uma freqüência diferente da original.

O setup da figura 10 a seguir possui um laser a fibra mais o amplificador como meio de ganho e a mesma para funcionamento como espelho para incidência e reflexão do campo. Em regime de operação o laser possui um conjunto de modos espaçados pela freqüência fundamental da própria cavidade, ou seja, o tamanho em metro de fibras será responsável pelo valor da freqüência. O modo dominante e o conjunto de supermodos são re-amplificados e se propagam dentro do anel.





Além do modulador e do laser existem dispositivos importantes como: filtro óptico e controlador de polarização. A presença do filtro é para que o comprimento de onda de oscilação seja o valor sintonizado ao passo que o controlador de polarização existe para otimizar o sinal dado que as fibras de entrada e saída do modulador são *Hi-Bi*.

O modulador é responsável pelo travamento de modos de ordem superior, ou seja pelo travamento de harmônicos de ordem superior para o pulso curto medido na saída do setup. A exata equalização de fase, amplitude e frequência do sintetizador com tempo de voô livre da cavidade resultará em um acoplamento modal originando um pulso óptico curto.

Quando a condição de ganho máximo é alcançada para um sinal dentro da cavidade em uma determinada freqüência que possui mesma fase e amplitude da freqüência uma quantidade de modos travados e a cavidade é forçada a operar na freqüência de modulação, desse modo constituindo um travamento de modos ativo. A sintonia de RF funciona como a figura de um maestro para uma orquestra, pois é responsável pelo timing, sincronismo e precisão em que o

modulador deve abrir ou fechar. Desse modo o compasso pode ser determinado para valores harmônicos exatos ou não. [13].

A pureza espectral e a razão de extinção do modulador vêem em segundo plano sendo responsabilidade não mais do maestro mas da orquestra, ou seja, o meio de ganho da cavidade deve ser estável com modos laterais da freqüência fundamental possuindo mesma amplitude e fase constante. Flutuações nesses parâmetros produziram pulsos na saída do anel instáveis no tempo. Como forma de prevenir este fenômeno foram tomadas duas providências: no meio de ganho optou-se por utilizar uma fibra dopada de núcleo elíptico visto que a polarização do próprio anel segue a simetria do guia e em seguida toda a cavidade foi isolada em uma "geladeira", ou seja, um sistema refrigerador isolado o qual será detalhado em uma seção detalhando a construção e o por que do uso de tal configuração.

Foram realizados testes com amplificadores com fibras dopadas a érbio na banda C e L para determinar o melhor opção. O comprimento da cavidade em anel, determina a freqüência fundamental em que o laser a fibra funcionará o conjunto de dispositivos para o funcionamento fazem parte e são importantes no cálculo do tempo de coerência. O tamanho da cavidade é definido pela relação:

$$F_{cav} := \frac{c}{L} \tag{2.4.6}$$

$$N_{=} \frac{P}{\tau}$$

$$t_{n} = 2NL$$

$$(2.4.6.a)$$

Onde, os parâmetros c e L representam a velocidade da luz e o comprimento efetivo da cavidade em metros. Quanto maior for o tempo de coerência melhor e maior será a quantidade de modos acoplados conforme indicam as relações 2.4.6.a e 2.4.6.b os melhores ajustes da cavidade foram feitos mediante a testes preliminares e inicialmente foi usado um amplificador na banda L com uma cavidade de 2 MHz, ou seja a freqüência fundamental do laser com comprimento de 100 m sendo que 74,37 m eram de fibra dopada. Em seguida em outro amplificador fio medido o tempo de vôo de 3,2 Mhz com um tamanho de

¢

(2.4.6.b)

62.5 m. Finalmente foi utilizado um EDFA que tem uma freqüência fundamental de 9.58 MHz. A terceira configuração apresentou uma melhor performance, dado que existe uma relação de compromisso entre o tempo de coerência e freqüência fundamental. Quanto maior for a freqüência melhor será o travamento de modos de ordem superior do laser.

A potência de modulação constitui um importante fator para geração visto que observou-se uma relação com o mesmo conforme as equações a seguir 2.4.7 e 2.4.8. Ela é responsável pela intensidade em que o modulador abrirá ou fechará passagem de luz conforme indica para cada tipo de modulação a relação abaixo:

$$\Delta_{m} \begin{cases} P_{m} \text{ Mode Locked AM} \\ P_{m}^{1/2} \text{ Mode Locked FM} \end{cases}$$
(2.4.7)
(2.4.8)

De maneira que para modulação AM a dependência é linear, ao passo que para modulação FM é com raiz quadrada, A largura do pulso no entanto esta associado com a relação  $(P_m^{1/4})$  em AM e  $(P_m^{1/8})$  para FM , o efeito do travamento dos modos é análogo a menos do esquema de modulação utilizado

Na figura 11 indica-se o tempo de vôo do sinal dentro cavidade com uma freqüência próxima de 9.58 MHz, este é o valor para operação livre dos pulsos o qual também constitui o espaçamento entre os supermodos.





O perfil do pulso como observado pelas figuras 11 e 12 podem ser descritos próximos do comportamento de um pulso gaussiano.A freqüência da cavidade é

resultado da formação de um modo dominante o qual é re-amplificado e fica circulando pela cavidade com um espaçamento de 104 ns entre os pulsos, semelhantemente ao comportamento descrito da figura 3 .O comprimento total do anel é da ordem de 20.87 m, sendo muito menor em relação as configurações utilizadas anteriormente apresentando uma coerência maior.

A polarização elíptica em simetria ao guia associado com a alta intensidade do sinal óptico dentro da cavidade produz os pulsos curtos. O espectro da transformada de Fourier do sinal cw apresenta o comportamento no domínio da freqüência como é indicado pela figura 12 a seguir.



Figura 12 Transformada do sinal na cavidade

A figura 12 sintetiza o comportamento espectral do sinal cw dentro do anel, de modo que os harmônicos progressivamente caem na razão de 6 dB chegando até o 13º com amplitude de -76 dB as componentes indicadas da FFT são resultado da largura do pulso e do vôo livre dentro da cavidade,ou seja , a frequência de operação dentro do anel.

O sinal possui muita energia até o 5º harmônico com uma pureza espectral elevada e uma razão de extinção da ordem de 25dB, estas características permitem uma estabilidade do sinal a ser travado. A compreensão espectral do pulso travado é importante por ser capaz de relevar parâmetros que não seriam entendidos no domínio temporal em conjunto com flutuações na amplitude e fase.

Em seguida escolheu-se operar a cavidade na freqüência de 10 MHz, ou seja fora da freqüência fundamental que é da ordem de 9,58 MHz esta diferença de 0,42 MHz será responsável por pulsos na saída do anel com menor intensidade de amplitude como poder ser comprovado observado nas figuras 13 e 14 . A intensidade está diretamente relacionada com a quantidade de modos acoplados em uma frequência de travamento de acordo com as equações 2.4.6 a e b .



Figura 13 Sinal travado dentro da cavidade

O sinal modulado em relação ao cw apresenta-se mais estreito e com amplitude maior, isto ocorre devido a proximidade com a freqüência fundamental, não existem pulsos intermediários. A diferença entre o sinal cw e o modulado esta na quantidade de modos os quais são acoplados, de modo que a medida que cresce o acoplamento ,aumenta-se na relação quadrática a intensidade e reduz a largura do pulso. O espectro do sinal modulado em 10 MHz indica que o valor de -22,39 dBm passo que o sinal cw possui -33,78dBm para o mesmo harmônico contudo a diferença de 11,39 dB, ocorre entre as freqüências , o valor da intensidade cresce com o quadrado da amplitude do sinal travado.



# Figura 14 Modulação para sinal de 10 MHz

A diferença entre o 5º harmônico modulado e o cw, ou seja as figuras 12 e 14 é da ordem de 6 dB. Escolhendo-se uma freqüência mais elevada foi possível observar uma diferença razoável na configuração dos pulsos. No próximo caso foi feito diferente escolheu-se o 6º harmônico da fundamental, conforme a figura 15 indica o pulso travado.



Figura 15 Modulação para sinal de 58 MHz

Visualmente percebe-se que o sinal já apresenta maior intensidade em relação aos anteriores com um perfil quase senoidal . Observando o espectro do sinal modulado percebe-se que o travamento ocorreu exatamente sobre um harmônico visto a disposição e composição dos raias espectrais subseqüentes.



Figura 16 Transformada de Fourier do Sinal

O sinal travado da figura 16 possui uma amplitude de -26 dB ao passo que a freqüência fundamental do cw tem o 5° tem valor -51,20dB, resultando em uma diferença de 25,2dB Esta desigualdade indica a quantidade de energia que o pulso travado no harmônico superior ao da fundamental foi capaz de acoplar. É importante destacar a compreensão do funcionamento da cavidade no regime cw bem como sua freqüência fundamental de operação os quais são fatores fundamentais para que seja possível travar harmônicos de ordem superior e obter efeito multiplicativo.

A estabilidade da cavidade permite que os modos sejam travados com uma qualidade melhor bem como freqüências mais altas sejam alcançadas[13].

Visto que o meio é altamente birefrigente o efeito da polarização é extremamente importante para equalização dos pulsos, uma contribuição positiva foi a escolha do núcleo do meio de ganho com simetria elíptica. Destaco que particularmente apresentou-se como uma opção não usual visto que os trabalhos publicados não operam desta forma. Mesmo assim resolvi que deveria ser realizada para comparação.

Inicialmente o travamento de modos para geração de pulsos curtos ocorreu em freqüências abaixo de Ghz, de modo que foi observado que a intensidade dos pulsos bem como a quantidade de modos travados são resultados obtidos da relação da freqüência de sintonia,potência óptica dentro do anel e potência de modulação.

Como a figura 17 abaixo indica a operação em baixas freqüências tem como primeira característica a amplitude do pulso. A razão de extinção é o segundo valor a ser observado com valor 8.5dB para avaliar a qualidade do trem de pulsos.

A taxa de repetição é de 621.5 MHz com um largura de pulso a meia altura de 112 ps é o parâmetro fundamental para avaliar o comportamento.



Figura 17 Pulso gerado pelo travamento dos modos

O harmônico travado foi o 65° da freqüência fundamental, a quantidade de modos acoplados foi de 968 com uma razão de extinção de 9.2 dB . A partir desta taxa de torna-se interessante a transmissão de dados utilizando MLFRL, pulso que teriam 1,6 ns são reduzidos para 70 vezes menos do seu valor inicial. A FFT da figura anterior apresenta uma descrição espectral dos harmônicos contidos no pulso gerado, conforme indica a figura 18 abaixo.



# Figura 18 FFT do pulso de 112ps

Até a freqüência de 4Ghz ainda existe condição substancial para combinação,geração e travamento dos modos, ao passo que para valores superiores as amplitude dos harmônicos encontram-se muito atenuados.

É importante destacar que não há presença de pulsos intermediários para taxa de repetição, a simulação dos pulsos obtidos estão em consonância com valores medidos, conforme a figura 19.



Figura 19 Pulsos simulados no Maplev

Uma segunda bateria de medidas foi realizada para observação na faixa de 2 GHz dos modos travados originando um trem de pulsos como indica a figura 20 para travamento dos modos. O perfil assimétrico é resultado das limitações eletrônicas dos dispositivos de detecção e amplificação dos pulsos.



Figura 20 Pulsos gerados pelo travamento dos modos

A partir da freqüência de 2.48778 foi obtido um pulso com duração de 49,84 ps com um tempo de subida 31,25 ps e tempo de descida 30,75 ps, conforme indica a figura 21. Sendo que a razão de extinção é 24.4 dB, este valor apresenta um modo dominante com elevada potência óptica dentro do anel como também indica que os pulsos intermediários são praticamente inexistentes na figura abaixo.



Figura 21 Pulso de 49,89 ps

Este pulso é praticamente simétrico e com um perfil gaussiano, isto pode ser simplesmente observado pelos diferença percentual entre tempos de subida e descida de 1.6% com uma quantidade de modos acoplados de 2608 e valor esperado da largura do pulso 40 ps . Uma segunda característica observada foi a razão de extinção a qual imprimiu um duty cicle de 12.4%, dentro de uma margem aceitável para os pulsos gerados. A transformada rápida do pulso na figura 22 a seguir, discrimina no intervalo de 4.8 até 17.58 Ghz, ou seja entre o 2° e 7° harmônico componentes espectrais com energia para novos travamentos de modos.



# Figura 22 FFT do pulso de 49.75 ps

Devido ao acoplamento ótimo de modos pelo dial do sintetizador de frequências obtido na figura 22, ou seja, houve um somatório de todos os modos propagantes dentro da cavidade em conjunto resultando em uma interferência construtiva para o pulso gerado, praticamente não existem componentes espectrais acima de 17 GHz.



Figura 23 Pulsos gerado pelo travamento dos modos

Para este regime da figura 23 outros parâmetros tornam-se relevantes no cálculo dos pulsos da cavidade e o regime de operação, de modo que a dispersão da cavidade começa a influenciar no comportamento do pulso.

O harmônico travado foi 260° da freqüência fundamental, a quantidade de modos acoplados foi de 2098. A qualidade dos pulsos obtidos na taxa de repetição de 2,5 Ghz são resultado do travamento dos modos e seu comportamento no domínio da freqüência como indica a figura 24 do analizador elétrico a seguir, é confirmado pela diferença entre o modo dominante e os modos laterais que é de 23.95 dB.



Figura 24 Espectro do Sinal travado no ESA

A simulação dos resultados obtidos estão em consonância com valores medidos, conforme a figura 25 a seguir.



#### Figura 25 Pulsos simulados

O ajuste no dial do sintetizador da HP permite observar que os pulsos sofrem alterações em seus valores de amplitude e duração. A razão de extinção observada foi de 24.44 dB, flutuações em relação a este valor pode ocorrer alterações do valor de ajuste do dial do sintetizador para melhoria na qualidade dos pulsos.

A presença da cauda e pequenos pulsos intermediários são resultados do sistema estar operando no limite da resolução eletrônica permitida. Ainda assim como nas medidas realizadas anteriores o perfil do pulso não apresentava variações temporais superiores a 1 ps.

O gráfico da figura 26 abaixo indica o travamento dos modos para um pulso na mesma região da figura anterior mantendo as mesmas características quanto ao perfil do pulso bem como seu espectro. A diferença de 100 KHz, ou seja, 1.04% do tamanho da cavidade não alterou significativamente para este caso o comportamento do pulso.





A figura 27 a seguir apresenta a resposta espectral do pulso com seus respectivos harmônicos. Basicamente a diferença entre os dois gráficos é duração do pulso que é uma conseqüência do ajuste do dial neste caso foi de 4.6 ps. Uma análise estatística provou que nível de confidência é de 95%.



Figura 27 FFT do pulso 45.29 ps

O harmônico travado foi 260° da freqüência fundamental, a quantidade de 2396 foram modos acoplados. Problemas de sintonia com o travamento de modos provocam pulsos na saída de amplitude não homogêneas e pulsos intermediários

em decorrência das flutuações no espectro de freqüência no travamento do harmônico desejado. Isto foi evidenciado com as medidas feitas observando a figura 28



#### Figura 28 Pulso gerado fora de sintonia

Para este caso o pulso sintonizado encontrava-se fora da harmônico exato de travamento do modo[14] que pulsos intermediários estão presentes no pulso de saída com uma duração de 78.05 ps. Experimentalmente esses valores foram observados devido ao problema de travamento de harmônicos que não ocorreram de acordo com os parâmetros de fase e amplitude.

Outros fatores como o aumento excessivo da potência de radiofrequência e bias do modulador contribuem para o baixo acoplamento de modos e consequentemente alargamento dos pulsosO espectro do pulso com este comportamento pode ser descrito pela figura 29 a seguir.



Figura 29 FFT do pulso

Para a figura acima em que o travamento não ocorreu dentro do valor de freqüência determinado existem poucos modos acoplados , sendo assim, houve pouca informação espectral ou seja, uma baixa quantidade de harmônicos.

Na freqüência de operação 2.48318 GHz, ou seja, 460 Khz mais distante em relação ao comportamento do pulsos indicado na figura 28 os pulso têm demonstrado maior duração com tempo de subida 47.35 ps e descida.39.55 ps com razão de 16.47%. A diferença de 4.81% da freqüência para travamento dos modos da cavidade imprimiu nos pulsos de saída valores intermediários os quais reduziram a razão de extinção para 9.7 dB bem como aumento o duty cicle para 18.89% isto é resultado de um mau acoplamento dos modos como indica a figura 30 abaixo:



Figura 30 Pulso gerado fora do harmônico exato.

O espectro da figura 30 indica a fft do pulso gerado fora do travamento exato do harmônico da freqüência fundamental. Repare que para valores superiores a 10 GHz já não existem componentes espectrais, isto ocorre sempre que houver um baixo acoplamento modal, ou seja, a competição entre os supermodos atenua a energia do modo dominante e conseqüentemente aumenta sua duração no domínio do tempo produzindo um pulso na saída de menor amplitude.

Este tipo de pulso obtido não pode ser utilizado para transmissão de dados devido a largura,quantidade de pulsos intermediários. O conjunto destes fatores fornecerão um diagrama de olho ruim para o sistema . A transmissão em taxas elevadas, necessita de um duty cycle da ordem de 10%.



Figura 31 FFT do pulso 72.04 ps

Um segundo caso de operação seria o gráfico da figura 31 onde o deslocamento de 16,39 MHz em relação ao pulso da figura 2.4.22. O tempo de subida é de 73.28 ps e descida 53.22 os com uma razão de extinção de 12.17 dB e duty cicle de 16,3%. Este valor de encontra-se baixo devido a razão de extinção estar comprometida com a presença de pulsos intermediários.



Figura 32 Pulso 73,22 ps

O comportamento espectral destes pulsos na figura 32 indica que não existem componentes espectrais superiores a 10 GHz. Sendo que a baixa amplitude das raias espectrais é devido ao acoplamento reduzido de modos.



Figura 33 FFT pulso 73.22 ps

Além do travamento no harmônico é possível gerar os pulsos através do efeito multiplicativo. Para variações do dial entorno da região de 2.48 Ghz foram obtidos alguns gráficos, os quais serão descritos a seguir.

#### 2.1.7.Mode Locked Racional

O mode locked racional ou fracionário é resultado do travamento da frequência do sintetizador e o harmônico fundamental da cavidade com uma razão fracionária. A idéia do uso fracionáro para o travamento de modos foi proposta por Ahmed e Onodera, na para gerar pulsos em uma taxa de repetição superior a produzida pelo modulador, ou seja um efeito multiplicativo. Isto foi observado desintonizando o dial do sintetizador suavemente de acordo com as relações abaixo:

$$\mathbf{f}_{m} = (\mathbf{p} \mathbf{\pm}_{k}^{1}) \mathbf{f}_{k}$$
(2.4.8)

$$\mathbf{f}_{p} = (\mathbf{k}\mathbf{p} \pm 1)\mathbf{f}_{c} \tag{2.4.9}$$

Onde a variável k representa um número racional maior que 1 gerando pulsos óptico "n" vezes a frequência de multiplicação. Deste modo foi possível utilizar um modulator eletroóptico com sintetizador em 2.5 GHz gerando frequêncis até 3 vezes superiores a taxa de repetição do tom de radiofrequência.

Inicialmente para o primeiro ajuste do dial obteve-se uma freqüência de travamento de 4.29 Ghz gerando pulsos de 22ps de duração como indica o gráfico da figura 34 abaixo :



Figura 34 Pulso 22ps

Em virtude do efeito utilizado o espectro apresenta uma particularidade onde somente as raias de ordem par estão efetivamente presentes. Tal comportamento sugere uma "simetria" para a série de Fourier do sinal em questão conforme pode ser visto na figura 35 a seguir.



Figura 35 FFT do pulso de 22 ps

Um pequeno ajuste foi feito para reduzir a presença de pulsos intermediários para aumentar a razão de extinção chegando ao valor de 21.3 dB, apesar dos valores intermediários terem sido removidos , na calda dos pulsos foram formados subpulsos conforme indica o gráfico da figura 36 a seguir.



Figura 36 Pulso de 28.11 ps

A FFT do sinal indica raias espectrais até 17 GHz com pequenos valores de amplitude, contudo pode-se observar uma quantidade de harmônicos no espectro do pulso gerado de acordo com o gráfico da figura 37 abaixo.



Figura 37 FFT do pulso de 28.11 ps

Apesar de serem pulsos mais estreitos estes não apresentam um comportamento estável o qual possa ser utilizado na multiplexação óptica. Uma razão de extinção baixa formará um diagrama de olho ruim.

Um terceiro caso próximo da região de 2.48 GHz esta indicado no gráfico da figura 37 onde os pulsos impressos com duração de 34 ps. O tempo de subida é 33.75 ps e descida 59.31 ps com uma razão de extinção de 11.08 dB. Existem pequenos pulsos intermediários e subpulsos presentes na cauda conforme o gráfico da figura 38 a seguir.



#### Figura 38 Pulso de 34 ps

Tal qual os valores apresentados nos gráficos anteriores os pulso nesta faixa de duração são extremamente sensíveis a flutuações ou variações eletrônicas de qualquer natureza junto ao conjunto fotodetector e amplificador.

A fft do pulso discrimina raias espectrais até 12.5 GHz, sendo que a partir do 3º harmônico os valores de amplitude podem ser desprezados, conforme indica a o gráfico da figura 39 a seguir.



Figura 39 FFT do pulso de 34ps

Elevando-se a freqüência para região de 2.5 GHz foi obtido um pulso com maior duração porém com razão de extinção alterada para 14.156 dB sem a presença de pulsos intermediários. O tempo de subida é de 37.84 ps e descida 23.78 ps como indica o gráfico da figura a seguir 40.



Figura 40 Pulso de 38.70 os

Os pulsos das figura acima apresentou durante a toma de medidas flutuações nos valores de amplitude bem como surgimento de pequenos valores intermediários.

A FFT apresenta um conjunto de componentes espectrais geradas em conseqüência do travamento dos modos. Os harmônicos apresentados no gráfico da figura 40 podem ser incluídos como possíveis freqüências para o travamento de novos valores, sendo deste modo visualizados em um intervalo de 5 até 17 GHz ou seja do 2º ao 7º harmônico.



Figura 41 FFT pulso de 38.70ps

Nas medidas a seguir um fenômeno multiplicativo pode ser observado, o travamento de harmônicos superiores pela freqüência natural de modulação de pulsos na saída do anel. O gráfico da figura 42 abaixo, indica o sinal gerado na faixa de 2.5 G e travou-se os modos com uma taxa de 7.29 Ghz, cerca de 3 vezes seu valor original . As flutuações na amplitude dos pulsos é consequência da competição dos super modos dentro da cavidade do anel



Figura 42 Pulso 30,54 ps.

O travamento dos modos permitiu que pulsos mais curtos fossem obtidos como o caso de valor indicado na figura 42. Neste regime a duração do pulso foi de 30.54 ps para uma taxa de repetição de 2.511 GHz com uma razão de extinção de mais de 20 dB.

O harmônico travado foi 262º da freqüência fundamental com uma quantidade de modos acoplados 2694. A simulação dos pulsos obtidos ainda estão em consonância com valores medidos, conforme a figura 25.

Após as medidas realizadas anteriormente observou-se que em determinados casos o efeito multiplicativo foi observado. Um pulso da ordem de 30.54 ps foi medido sobre este regime com uma freqüência de travamento de 7.290Ghz . Não há uma homogeneidade nas amplitudes em decorrência de que não foi travado um harmônico exato conforme indica a figura 39 com tempo de subida de 37.8 ps e descida 41.54 ps .

Em seguida o segundo caso para o travamento de pulsos de ordem superior ocorreu na faixa de 7.7GHz conforme indica o gráfico da figura 43 abaixo.



Figura 43 Pulso de 28.11 ps

Os pulsos das figuras 42 e 43 demonstram a viabilidade da técnica de geração dos pulsos curtos , porém para estes casos a multiplexação óptica, objetivo final, não é exequível devido a instabilidade presente durante as medidas. A frequência de sintetização foi de 2.5 Ghz com travamento no 3º harmônico com 7.7 Ghz. A capacidade 3 vezes acima do valor de operação constitui um efeito multiplicativo.

A não homogeneidade da amplitude dos pulsos é conseqüência do efeito multiplicativo em associação com os modos acoplados dentro da cavidade do anel. Destaca-se uma razão de extinção da ordem de 25.75 dB, pulsos com essa duração são extremamente sensíveis a ruídos elétricos oriundos do fotodetector.

O espectro de Fourier do gráfico anterior apresenta uma quantidade de raias espectrais baixas em virtude do acoplamento dos modos . Onde a partir de valores efetivos acima de 15 GHz possuem amplitude baixíssima de acordo com a figura 44 a seguir.



Figura 44 FFT pulso de 28.11 ps

A grande vantagem de operar sob o regime multiplicativo na geração de pulsos curtos ópticos é a possibilidade do travamento de freqüências de ordem superior. Durante o ensaio experimental foram observadas freqüências até 3 vezes maiores do que a taxa de repetição. Um caso particular foi o efeito de "down

converter" em caso em que operou-se na taxa de 4 Ghz e as freqüências na saída do anel a taxa de repetição era de 1.1 Ghz. O harmônico travado foi 804º da freqüência fundamental, a quantidade de modos acoplados foi de 3174. Percebese uma quantidade de modos maiores em relação as freqüências de travamento anteriores devido ao acoplamento dos modos sendo que nos casos do efeito multiplicativo e down converter, a sensibilidade do anel a polarização aumentou.

A fft do sinal da figura anterior apresenta o conteúdo espectral das raias componentes do pulso óptico gerado visto as condições de formação dos pulsos, valores acima do 2º harmônico são desprezados pela baixa amplitude, conforme indica a figura 45 a seguir.



Figura 45 FFt pulso de 30.54ps.



# Figura 46b

Este foi o pulso padrão tomado como referência para operação do setup na geração dos pulsos ópticos. O harmônico travado foi 258° da freqüência fundamental, a quantidade de modos acoplados foi de 2305. Repare que este pulso esta dentro da bitslot de 50ps requeridos para futura multiplexação dos

sinais ópticos. Observe que pela figura 46b indica uma aproximação da distribuição gaussiana para o pulso gerado, o nível de confiabilidade para esta análise foi de 95%, de acordo com os parâmetros obtidos abaixo:

Data: Pulso de aprox gaussiano
Modelo: Gauss
Equação $y=y0 + (A/(w*sqrt(PI/2)))*exp(-2*((x-xc)/w)^2)$
Weighting:
No weighting
$Chi^2/DoF = 0.00004$
$R^2 = 0.96501$
$\pm 0.0003 \pm 0.0003$
ac 2.2045E-8 ±1.9912E-13
$x = 3.5596E-11 \pm 4.1302E-13$
A 6.055E-12 ±6.4979E-14

 Tabela 1
 Parâmetros estatísticos analisados.