



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

SÉRGIO TAHIM DE OLIVEIRA

**SISTEMAS ÓPTICOS DE GERAÇÃO DE FREQUÊNCIAS HARMÔNICAS DE
MICRO-ONDAS COM MODULAÇÃO DE FASE**

FORTALEZA

2017

SÉRGIO TAHIM DE OLIVEIRA

SISTEMAS ÓPTICOS DE GERAÇÃO DE FREQUÊNCIAS HARMÔNICAS DE
MICRO-ONDAS COM MODULAÇÃO DE FASE

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia de Teleinformática do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Teleinformática. Área de Concentração: Dispositivos ópticos e de micro-ondas.

Orientador: Prof. Dr. João Batista R. Silva.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D32s de Oliveira, Sérgio Tahim.
Sistemas Ópticos de Geração de Frequências Harmônicas de Micro-ondas com Modulação de Fas / Sérgio Tahim de Oliveira. – 2017.
68 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. João Batista Rosa Silva.

1. Micro-ondas. 2. Fotônica. 3. Modulação de fase. 4. Geração de harmônicas. I. Título.

CDD 621.38

SÉRGIO TAHIM DE OLIVEIRA

SISTEMAS ÓPTICOS DE GERAÇÃO DE FREQUÊNCIAS HARMÔNICAS DE
MICRO-ONDAS COM MODULAÇÃO DE FASE

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia de Teleinformática do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Teleinformática. Área de Concentração: Dispositivos ópticos e de micro-ondas.

Aprovada em: 27/07/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Batista R. Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Rubens Viana Ramos
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Para Aline e unicamente a ela, que esteve , está
e sempre estará ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, o qual deixo meu agradecimento.

À minha esposa Aline pelo suporte em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. João Batista por sua infinita paciência na orientação da minha dissertação de mestrado assim como no meu trabalho de conclusão de curso durante a graduação.

Ao Prof. Dr. Rubens Viana pelas cobranças que sempre me elevaram como estudante e pesquisador.

Ao Grupo de colegas do Grupo de Informação Quântica (GIQ), pela acolhida incondicional e a troca de experiências sem restrições.

Agradeço a todos os professores que me proporcionaram conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender.

Ao Instituto Federal do Ceará pela disposição no uso de sua ferramenta computacional de dispositivos ópticos *OptiSystem*®.

"A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,
mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre
aquilo que todo mundo vê."

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Geração fotônica de micro-ondas e ondas milimétricas tem sido um assunto de grande interesse nas últimas décadas. Avançadas técnicas de geração, assim como o desenvolvimento de componentes fotônicos tem permitido a geração de sinais de alta frequência e baixo ruído de fase. Esse trabalho consiste em duas partes. Na primeira parte temos a apresentação de técnicas para geração de sinais de micro-ondas através de multiplicação de frequência. Multiplicação de frequência pode ser obtida no domínio óptico através de batimento de ondas em dispositivos não lineares bem como através de modulação externa com o uso de moduladores *Mach-Zehnder* (MZM). Dois MZM cascateados conduzem a fatores de multiplicação que quadruplicam, sextuplicam e até mesmo octuplicam a frequência do sinal de entrada do sistema aplicado. Apresenta-se também técnicas que utilizam laços ópticos para multiplicação de micro-ondas através de geração de componentes harmônicas da frequência modulada. Na segunda parte apresentam-se três novos sistemas ópticos baseados em geração fotônica de sinais de micro-ondas, em particular utilizando a natureza cíclica de laços ópticos e dimensões milimétricas a fim de simular o comportamento de circuitos de guias integrados em silício e as propriedades não lineares de moduladores de fase para geração de frequências harmônicas de sinais de RF e de micro-ondas, com eficiência na geração da segunda a quinta harmônica de um sinal modulado em fase. Nesse estudo utilizou-se a ferramenta computacional *OptiSystem*[®] para a modelagem, simulação e aquisição de dados que conduziram aos resultados aqui discutidos.

Palavras-chave: micro-ondas; fotônica; modulação de fase; geração de harmônicos.

ABSTRACT

Photonicallly generated microwave and millimeter-wave signals have been a subject of great interest in recent decades. Advanced generation techniques, as well as the development of photonic components, have enabled the generation of high-frequency signals with low phase noise. This work consists of two parts. The first part presents techniques for microwave signal generation through frequency multiplication. Frequency multiplication can be achieved in the optical domain through wave beating in nonlinear devices as well as through external modulation using Mach-Zehnder modulators (MZM). Two cascaded MZMs lead to multiplication factors that quadruple, sextuple, and even octuple the frequency of the input signal applied to the system. Techniques utilizing optical loops for microwave multiplication via generation of harmonic components of the modulated frequency are also presented. The second part introduces three new optical systems based on photonic generation of microwave signals, particularly using the cyclical nature of optical loops and millimeter-scale dimensions to simulate the behavior of integrated silicon waveguide circuits and the nonlinear properties of phase modulators for generating harmonic frequencies of RF and microwave signals. This approach efficiently generates the second to fifth harmonic of a phase-modulated signal. The computational tool *OptiSystem*[®] was utilized in this study for modeling, simulation, and data acquisition, leading to the results discussed here.

Keywords: microwaves; photonics; phase modulation; harmonic generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Acoplador óptico.	22
Figura 2 – Fotodetector PIN.	24
Figura 3 – Sistema óptico para geração de um sinal de micro-ondas a partir do batimento de duas portadoras ópticas.	32
Figura 4 – Esquema do modulador Mach-Zehnder.	36
Figura 5 – Sistema óptico para multiplicação de um sinal de micro-ondas a partir de um modulador <i>Mach-Zehnder Dual Parallel</i>	38
Figura 6 – Espectro óptico do sistema com Dual Parallel Modulator Mach-Zehnder (DPMZM).	39
Figura 7 – Sistema óptico para multiplicação de um sinal de micro-ondas a partir de dois moduladores <i>Mach-Zehnder</i> cascadeados.	40
Figura 8 – Espectro de frequência na saída do sistema de moduladores cascadeados. a) Saída do primeiro modulador. b) Saída do segundo modulador.	40
Figura 9 – Sistema multiplicador de frequências moduladas por seis.	41
Figura 10 – Espectro de frequência na saída do sistema de multiplicador de frequência por seis.	41
Figura 11 – Sistema multiplicador de frequências moduladas por oito.	42
Figura 12 – Espectro de frequência na saída do sistema multiplicador de frequência por oito.	43
Figura 13 – Sistema óptico para geração de harmônicos de micro-ondas a partir modulação de fase.	44
Figura 14 – Geração da harmônica de quarta ordem a partir modulação de fase em <i>loop</i>	45
Figura 15 – Sistema geração da harmônicos pares.	46
Figura 16 – Sistema 1: <i>loop</i> óptico e dupla modulação de fase.	48
Figura 17 – Sistema 2 - Duplo <i>loop</i> óptico em paralelo com modulação de fase.	49
Figura 18 – Sistema 3: triplo <i>loop</i> óptico e tripla modulação de fase.	50
Figura 19 – Projeto do Sistema 1 no <i>OptiSystem</i> ®.	51
Figura 20 – Projeto do Sistema 2 no <i>OptiSystem</i> ®.	52
Figura 21 – Projeto do Sistema 3 no <i>OptiSystem</i> ®.	52
Figura 22 – Instante capturado na tela do analisador de espectro virtual do <i>OptiSystem</i> ®.	54
Figura 23 – Sistemas - Modulação 1 GHz e potência 0 dBm sem fase no <i>loop</i>	55

Figura 24 – Sistemas - Modulação 1 GHz e potência 3 dBm sem fase no <i>loop</i>	56
Figura 25 – Sistemas - Modulação 10 GHz e potência 0 dBm sem fase no <i>loop</i>	56
Figura 26 – Sistemas - Modulação 10 GHz e potência 3 dBm sem fase no <i>loop</i>	57
Figura 27 – Sistemas - Comparativo de potências e adição de fase no <i>loop</i>	58
Figura 28 – Sistema 1 - Modulação 1 GHz e potências: 0 e 3 dBm sem fase no <i>loop</i> . . .	58
Figura 29 – Sistema 1 - Modulação 10 GHz e potências: 0 e 3 dBm sem fase no <i>loop</i> . . .	59
Figura 30 – Sistema 2 - Modulação 10 GHz e potências: 0 e 3 dBm sem fase no <i>loop</i> . . .	59
Figura 31 – Sistema 2 - Modulação 1 GHz e potências: 0 e 3 dBm sem fase no <i>loop</i> . . .	60
Figura 32 – Sistema 3 - Modulação 1 GHz e potências: 0 e 3 dBm sem fase no <i>loop</i> . . .	61
Figura 33 – Sistema 3 - Modulação 10 GHz e potências: 0 e 3 dBm sem fase no <i>loop</i> . . .	62
Figura 34 – Sistema 3 - Comparativo entre modelo teórico e simulado.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configuração básica dos sistemas ópticos.	52
Tabela 2 – Configuração usada no <i>OptiSystem</i> ©	53
Tabela 3 – Potências dos harmônicos do Sistema 1 - (dBm) - Modulação 10 GHz e potência no Laser em 0 dBm.	57
Tabela 4 – Potências dos harmônicos do Sistema 1 - (dBm) - Modulação 10 GHz e potência no Laser em 3 dBm.	57
Tabela 5 – Potências dos harmônicos do Sistema 2 -(dBm) - Modulação 10 GHz e potência no Laser em 0 dBm.	60
Tabela 6 – Potências dos harmônicos do Sistema 2 -(dBm) - Modulação 10 GHz e potência no Laser em 3 dBm.	61
Tabela 7 – Potências dos harmônicos do Sistema 3 -(dBm) - Modulação 10 GHz e potência no Laser em 0 dBm.	61
Tabela 8 – Potências dos harmônicos do Sistema 3 -(dBm) - Modulação 10 GHz e potência no Laser em 3 dBm.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BS	beam splitter
CW	continuous wave
DPMZM	Dual Parallel Modulator Mach-Zehnder
EDFA	amplificador de fibra de Érbio dopado
ESA	analisador de Espectro
FET	transistores de efeito de campo
IMPATT	ionização por impacto e de tempo de trânsito por avalanche
MZM	<i>Mach-Zehnder Modulator</i>
OSA	amplificador óptico
PA	amplificador de potência
PC	controlador de polarização
PD	fotodiodo
PM	modulador de fase
PS	deslocador de fase
RF	Rádio Frequência
RoF	Rádio sobre fibra
SMF	fibra monomodo
TBJ	transistores bipolar de junção
TOPS	deslocador óptico de fase tunável

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Introdução	16
2.2	Breve história da geração de sinais de micro-ondas.	16
2.3	Componentes ópticos.	20
2.3.1	<i>Acoplador óptico.</i>	20
2.3.2	<i>Fotodiodo PIN.</i>	23
2.3.3	<i>Laser.</i>	24
2.3.4	<i>Modulador de fase</i>	29
2.4	Técnicas de geração de harmônicas	31
2.4.1	<i>Geração de micro-ondas por detecção heteródina</i>	31
2.4.2	<i>Geração de micro-ondas por modulação de externa de intensidade.</i>	35
2.4.3	<i>Técnica de geração de micro-ondas por loop óptico.</i>	42
3	SISTEMAS DE GERAÇÃO DE HARMÔNICOS: SISTEMAS E METODOLOGIA	48
3.1	Introdução.	48
3.2	Sistema 1: Loop óptico e dupla modulação de fase.	48
3.3	Sistema 2: Duplo loop óptico em paralelo com modulação de fase.	49
3.4	Sistema 3: Triplo loop óptico e tripla modulação de fase.	50
3.5	Metodologia.	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1	Introdução	55
4.2	Análise comparativa dos sistemas	55
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	64
	REFERÊNCIAS	66
	ANEXO A –ARTIGO PUBLICADO	68

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia por trás dos sinais de Rádio Frequência (RF) é a base de todos sistemas que envolvem transmissão de informação. Independente do canal que essa informação é transmitida, sejam cabos elétricos ou guias ópticos há uma permanente necessidade de aperfeiçoamento no desempenho de geração e transmissão de micro-ondas .

Micro-ondas são ondas eletromagnéticas com frequências entre 3 GHz e 300 GHz suas aplicações incluem comunicações sem fio, redes ópticas de comunicações, sistemas de transmissão via satélite, sistemas militares de radar.

A abordagem principal desse trabalho é a interação entre a luz e o elétron, nesse sentido (CAPMANY; NOVAK, 2007; MARPAUNG *et al.*, 2013), discutem a fotônica como uma solução para o aumento da eficiência dos sistemas de rádio frequência, aproveitando a utilização da banda óptica como portadora e geradora de Rádio Frequência (RF). Como consequência aos poucos vários sistemas, como o de telecomunicações por exemplo, tem substituído seus componentes elétricos por dispositivos ópticos, pela percepção de que componentes eletro-eletrônicos não suportam o incremento das bandas de utilização de espectro e que em altas frequências, cabos coaxiais e guias metálicos apresentam altas taxas de atenuação dos sinais transportados. (KHANNA, 2006) apresenta o estado da arte de geradores de sinais que basicamente utilizam osciladores construídos através de dispositivos eletrônicos para a geração de sinais de micro-ondas.

Sistemas fotônicos apresentam baixas perdas de potência e são imunes a interferências eletromagnéticas, portanto seus componentes integrados apresentam-se como uma alternativa para solução de problemas em sistemas que necessitem de uma alta sensibilidade a ruídos. (YAO, 2010) apresenta técnicas de geração de micro-ondas, que apropriaram-se de um importante fenômeno físico chamado de *injection locking*, princípio discutido em (LEE, 2013), desde o âmbito histórico até a utilização nos discutidos sistemas ópticos deste texto para a redução do ruído, particularmente o de fase, recorrente das técnicas de geração de Rádio Frequência (RF) , também (YAO, 2010) discute seu sucesso na supressão das não linearidades recorrentes principalmente no uso de dispositivos durante processo obtenção de micro-ondas.

Demonstra-se matematicamente, também, em (IIZUKA, 2013) que o princípio de geração é basicamente feito pela *mixagem* de ondas através de batimento na injeção óptica por modulação externa. São técnicas, que confirmam o sucesso da fotônica, no que diz respeito a baixa complexidade e execução, entretanto em contrapartida há o custo relacionado em

desenvolvimento de tais dispositivos, além do inevitável ruído devido a modulação direta dos lasers , dispersão em fibras etc.

A geração fotônica de sinais através de heterodinagem de duas fontes de comprimentos de onda ligeiramente diferentes ou seja batimento de ondas ópticas, também são apresentados como alternativas em geração de micro-ondas.

Dessa forma surgem várias técnicas de geração de sinais de RF através de sistemas eletro-ópticos, nesse caso, utilizando moduladores de intensidade *Mach-Zehnder*, (HILT, 2016) apresenta em seu artigo, técnicas gerais de geração de micro-ondas valendo-se desde o efeito eletro-óptico de um modulador *Mach-Zehnder* até multiplicação de micro-ondas pela geração de harmônicos de um sinal fundamental, descrito como foto-deteção quadrática, onde a corrente detectada no fotodiodo é proporcional a intensidade óptica. Faz-se uso de dois moduladores *Mach-Zehnder* cascadeados e polarizados em seus pontos de máxima transmissão ou usando três moduladores dois deles paralelos compactados nos braços de um maior , essas configuração conduz a multiplicação, pela presença das bandas laterais esquerda e direita, múltiplas da frequência modulada, em quatro vezes. Já (ZHOU *et al.*, 2013; ZHANG *et al.*, 2007b) usando dois moduladores *Mach-Zehnder* polarizados em seus pontos de máxima transmissão com supressão de portadora, multiplica por até um fator de seis a frequência modulada. (ZHANG *et al.*, 2007a), utiliza um modulador de fase em substituição a um dos moduladores de intensidade usados nos sistemas anteriores, gerando também bandas laterais em até oito vezes, nesse caso com a adição de um deslocador de fase óptico tunável e um amplificador EDFA a uma estrutura de moduladores *Mach-Zehnder* cascadeados (LI; YAO, 2010), todas essas configurações multiplicando sinais através de batimento de ondas na região ativa de um fotodiodo.

O processo de interferência de ondas ópticas na região ativa de um fotodiodo (PROTOPOV, 2009), é exatamente a chave para algumas das citadas técnicas, conhecido como heterodinagem. Interferência e batimento então, foram pontos de partida para desenvolvimento dos conceitos finais e fornecem a fundamentação teórica nesse ponto inicial, logo a geração de harmônicos está a real motivação do estudo em questão, a produção de múltiplos da frequência fundamental de um sinal senoidal em um processo multiplicativo, então a obtenção das harmônicas de sinais modulados o caminho para de obtenção de RF, (HEDEKVIST *et al.*, 2004) emprega o uso de propriedades de moduladores de fase ópticos para geração de harmônicos, configurando dispositivos de polarização, fibras ópticas em *loop* espelhos a fim de induzir diferença entre caminhos ópticos e conseqüentemente, interferência de feixes.

Nesse sentido, montagens constituídas de dispositivos ópticos usando configurações de fibra óptica em laço são apresentadas por (INSUA; SCHAFFER, 2007) e (OLIVEIRA *et al.*, 2011), este último capaz de separar harmônicas pares e ímpares de um sinal RF modulado .

Assim, esse trabalho apresenta três propostas de sistemas ópticos baseadas em anéis e modulação de fase capazes de gerar frequências harmônicas de sinais de micro-ondas.

Portanto, esse trabalho está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 são apresentados os conceitos gerais referentes a geração de micro-ondas, abordando heterodinagem e obtenção de RF via modulação externa e geração de harmônicos pela utilização de laço óptico; no Capítulo 3 são apresentados os sistemas simulados propostos, descrevendo as diferenças entre eles e também a descrição do procedimento de simulação, desde a configuração de software até o processamento dos dados reunidos; no Capítulo 4 são discutidos os resultados dos dados observados e processados através de ferramentas computacionais, além da apresentação de gráficos comparativos das potências espectrais dos harmônicos gerados por ambos os sistemas; e por fim no Capítulo 5 são apresentados as conclusões e perspectivas desse trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Introdução

Nesse capítulo serão apresentados os principais métodos e configurações para geração de sinais de RF e micro-ondas através de componentes fotônicos e suas tecnologias. A Seção 2.2 apresenta um desenvolvimento histórico sobre a evolução da geração de sinais, a Seção 2.3 apresenta uma descrição e fundamentação matemática dos principais componentes utilizados e finalmente a Seção 2.4 descreve a motivação no uso da fotônica e seus componentes, discutindo os métodos de geração de micro-ondas através de detecção heteródina e batimento de ondas, além descrever os métodos que usam modulação de intensidade e abordando também as técnicas que motivaram esse trabalho: A geração de micro-ondas por meio de geração de harmônicas através de laço óptico.

2.2 Breve história da geração de sinais de micro-ondas.

No princípio, osciladores elétricos eram a única base para circuitos de geração de micro-ondas, na década de 1970 surgiram diodos osciladores geradores de sinais: diodo GUNN e IMPATT.

O diodo GUNN é um dispositivo semicondutor que possui três camadas, uma camada chamada intrínseca de material semicondutor é inserida entre duas camadas dopadas. Quando uma tensão elétrica é aplicada à camada intrínseca, uma região de alta densidade de elétrons é formada, chamada de região de *drift* nessa região ocorre uma queda de tensão significativa, e leva o dispositivo a ressonância de micro-ondas. Quando uma fonte de sinal de polarização é aplicada ao diodo GUNN, a corrente flui através de todas as três camadas do dispositivo, criando um forte campo elétrico na região de *drift*. Esse campo elétrico ressona em uma frequência específica, que é determinada pelas propriedades de material do dispositivo. Quando sinal de volta é refletido a partir da extremidade do diodo, ele é modulado pela região de *drift* ressonante, criando uma onda de micro-ondas.(POZAR, 2011)

O diodo GUNN é então usado como fonte de oscilação em circuitos de micro-ondas, tais como controladores de frequência, amplificadores e osciladores. Sua distinção se dá por sua alta potência de saída, em comparação com o tamanho compacto do dispositivo. Além disso, o diodo GUNN pode ser modulado a frequências elevadas e pode operar em temperaturas elevadas

sem sofrer envelhecimento prematuro.

O diodo ionização por impacto e de tempo de trânsito por avalanche (IMPATT), é um dispositivo semicondutor usado principalmente em frequências de micro-ondas e é capaz de gerar ondas de rádio de alta frequência, sistemas de radar e comunicações por satélite são exemplos. Trata-se de um dispositivo é constituído por duas regiões dopadas que cristalizam um terceiro material dopado, formando uma junção PN ou NP. Quando uma tensão é aplicada nessa junção, ocorre uma corrente conhecida como corrente de fuga, que gera elétrons e lacunas no material dopado. (POZAR, 2011) Os elétrons e lacunas são acelerados por um campo elétrico elevado que é aplicado a partir do lado do material n ou p, e como resultado, eles colidem com outros elétrons e produzem novos pares elétrons-lacunas, originando assim uma corrente de alta frequência. Isso fornece energia para gerar ondas com frequências tão altas como 100 GHz.

Diodos IMPATT geram micro-ondas usando o impacto de portadores de carga em uma região de junção de específica do dispositivo, enquanto os diodos Gunn geram oscilações de radiofrequência usando uma estrutura de canal de micro-ondas acoplada a uma região de junção PN deste diodo em questão.

Com o surgimento dos transistores de efeito de campo (FET) e transistores bipolar de junção (TBJ), tais tecnologias entraram em declínio e TBJs dominaram o cenário devido a sua capacidade de conceber osciladores que atingiam frequências acima de 20 GHz, e melhor ainda em capacidade de geração de micro-ondas, os FET que atingiam frequências de oscilação acima de 100 GHz, como vantagens ambos apresentam menos perdas com ruído de fase e são dispositivos mais discretos. (KHANNA, 2006).

Existem várias vantagens do uso de FETs (Transistores de Efeito de Campo) em comparação com diodos IMPATT e GUNN na geração de micro-ondas. Alguns dos benefícios são:

1. Menor ruído: FETs tendem a ter um ruído mais baixo do que diodos IMPATT e GUNN, tornando-os uma escolha ideal para aplicativos que requerem alta sensibilidade.
2. Menor perda de inserção: FETs têm um menor coeficiente de perda do que diodos IMPATT e GUNN, o que significa que menos energia é perdida durante a transição de uma fonte de alimentação para uma antena em um sistema de comunicação.
3. Amplificação: FETs possuem a capacidade de atuar como amplificadores em circuitos de RF, permitindo a criação de amplificadores de baixo ruído para sinais de micro-ondas.
4. Frequências mais altas: Os FETs normalmente têm capacidade de operação em

frequências mais altas do que diodos IMPATT e GUNN.

5. Menor consumo de potência: Em comparação com diodos IMPATT e GUNN, os FETs tendem a consumir menos energia para produzir a mesma potência de saída em sistemas de micro-ondas.

6. Menor tamanho e peso: O tamanho e peso dos FETs são geralmente menores do que os diodos IMPATT e GUNN, o que os torna adequados para aplicações em sistemas em miniatura.

As micro-ondas são também geradas em dispositivos chamados de *klystrons* e *magnetrons*. O funcionamento do *klystrons* é baseado em ressonância elétrica e magnética, que são sincronizadas com o movimento dos elétrons dentro do tubo eletrônico de vácuo. O dispositivo é composto por um canhão de elétrons, que emite feixes de elétrons em uma direção específica, e por uma série de eletrodos de transmissão. Os feixes de elétrons são acelerados por campos elétricos, passam por um campo magnético e realizam um movimento helicoidal em direção ao coletor de elétrons. Durante esse movimento, eles passam por ressonadores que estão sintonizados em frequências específicas. A oscilação dos elétrons em torno de seu trajeto faz com que a energia seja transferida para os ressonadores, produzindo uma oscilação elétrica. Com a sincronização da oscilação e da ressonância, a energia de micro-ondas é amplificada e transmitida através dos eletrodos de transmissão. Um *magnetron* é um dispositivo eletrônico que utiliza o campo magnético para gerar micro-ondas em altas frequências. Ele é comumente utilizado em fornos de micro-ondas, radares e comunicações por satélite.(POZAR, 2011)

O funcionamento do *magnetron* é baseado em um dispositivo de válvula termiônica (válvula de vácuo), que utiliza um filamento para aquecer um catodo e liberar elétrons. Esses elétrons são acelerados em direção a um ânodo com a ajuda de um campo elétrico externo. O campo magnético é então adicionado perpendicularmente a esse campo elétrico externo, e isso cria um movimento circular nos elétrons. Este movimento circular produz um campo elétrico adicional, que é capaz de gerar ondas eletromagnéticas em altas frequências. *magnetron*, as micro-ondas são geradas devido aos movimentos circulares dos elétrons acelerados que são desviados pelo campo magnético. Este movimento circular cria um campo elétrico que oscila em uma frequência de ressonância, a qual é determinada pelas dimensões e geometria do *magnetron*. Esse campo elétrico oscilante é amplificado pela interação entre os elétrons e as cavidades existentes no interior do *magnetron*, ressonantes em frequências específicas, gerando um fluxo contínuo de micro-ondas.(POZAR, 2011)

Entretanto nos últimos anos, a experiência positiva obtida no campo da fotônica impulsionou o uso de dispositivos concebidos através de estudos sobre interação da luz com a matéria, a assim fotônica atraiu investimentos em pesquisas. Muito disso é consequência das inúmeras propriedades que a sua natureza proporciona no campo de transmissão de informação, fatos esses decorrentes do grande potencial percebido durante o tempo, em realizar determinadas funcionalidades, antes descritas como complexas e até mesmo impraticáveis sob o ponto de vista da eletro-eletrônica. (YAO, 2010).

A geração de micro-ondas por meio de dispositivos que utilizam a fotônica é possível por meio de uma técnica chamada "geração de micro-ondas ópticas"(Optical Microwave Generation, em inglês). Nessa abordagem, a luz óptica de alta frequência é convertida em micro-ondas de frequência mais baixa.

A tecnologia fotônica tem várias vantagens para a geração de micro-ondas em comparação com outras tecnologias, como:

1. Maior largura de banda: a tecnologia fotônica pode gerar micro-ondas com largura de banda mais ampla do que as tecnologias convencionais, o que permite a transmissão de maiores quantidades de dados por segundo.
2. Menor perda de sinal: a tecnologia fotônica utiliza fibra óptica para transportar o sinal, o que significa que há menos perda de sinal em comparação com as tecnologias convencionais. Isso resulta em menos distorção do sinal e maior qualidade de transmissão.
3. Melhor estabilidade: a tecnologia fotônica é mais estável do que as tecnologias convencionais, o que significa que é menos suscetível a flutuações de temperatura e outras condições ambientais que podem afetar a qualidade do sinal.
4. Maior eficiência energética: a tecnologia fotônica é mais eficiente em termos de energia do que as tecnologias convencionais, o que significa que pode reduzir os custos de energia e emissões de carbono.
5. Menor tamanho e peso: a tecnologia fotônica pode ser criada em um pacote muito menor e mais leve do que as tecnologias convencionais, o que permite a sua implantação em espaços reduzidos e remotos com mais facilidade.

Existem várias técnicas diferentes para a geração de micro-ondas ópticas, e aqui estão algumas delas:

Modulação Óptica para Micro-ondas: Nessa técnica, um sinal de micro-ondas é modulado em um sinal óptico através de um dispositivo conhecido como modulador óptico. O

sinal óptico modulado é então transmitido através de fibras ópticas até um fotodetector, que converte o sinal óptico de volta para o domínio de micro-ondas.

Combinação de Laser: Nessa técnica, dois ou mais lasers de frequência óptica são combinados usando técnicas de interferometria óptica. A interferência entre os diferentes lasers gera uma diferença de frequência que corresponde à frequência desejada de micro-ondas.

Efeitos Não-Lineares: Alguns materiais ópticos exibem efeitos não-lineares, onde a interação com a luz óptica resulta na geração de novas frequências. Por exemplo, o processo de mistura de quatro ondas *Four-Wave Mixing* pode ser usado para gerar frequências de micro-ondas. Nesse processo, dois sinais ópticos de frequências diferentes interagem em um meio não-linear para gerar um novo sinal com a frequência de diferença correspondente à frequência de micro-ondas desejada.

Essas são apenas algumas das técnicas utilizadas na geração de micro-ondas por dispositivos fotônicos. A fotônica oferece várias vantagens, como alta velocidade de processamento, baixa perda de sinal e a possibilidade de integração com sistemas ópticos existentes.

A geração de sinais de micro-ondas, ou seja, frequências entre 3 GHz e 300 GHz, no domínio óptico trazem também vantagens quanto ao número de elementos empregados no seu desenvolvimento, bem como a facilidade da distribuição do sinal, diretamente em redes de fibra óptica, tecnologias Rádio sobre fibra (RoF). Sistemas que utilizam circuitos eletrônicos convencionalmente utilizam osciladores elétricos, consistindo de um dispositivo de ganho ativo e um dispositivo passivo de determinação de frequência de cavidade ressonante (KHANNA, 2006).

Controle e distribuição de sinais de micro-ondas implementados a partir de sistemas que utilizam-se de componentes ópticos, consistem basicamente na combinação de sinais modulados por uma portadora óptica (CAPMANY; NOVAK, 2007). Duas ou mais ondas podem combinar-se para formar novas ondas. Os mais comuns fenômenos de interação de ondas incluem a interferência, difração e batimento.

2.3 Componentes ópticos.

2.3.1 Acoplador óptico.

Acopladores ópticos são dispositivos passivos que acoplam luz através de guias de onda ou fibras. Eles desempenham um papel muito importante nas aplicações de dispositivos

e sistemas fotônicos. Os acopladores ópticos são usados de muitas maneiras diferentes. Eles podem ser a interface entre dispositivos em um sistema ou podem ser dispositivos importantes em si mesmos. A aplicação mais direta, porém importante, é para rotear ondas ópticas para acoplar diferentes dispositivos. Aplicações sofisticadas incluem dispositivos como conversores de polarização, conversores de modo, divisores de feixe, combinadores de feixes, acopladores direcionais, acopladores de ramificação, filtros de comprimento de onda, multiplexadores de comprimento de onda e assim por diante (LIU, 2005).

O conceito de acoplador engloba uma variedade de funções, incluindo a divisão um sinal de luz em dois ou mais feixes ou combinando dois ou mais feixes de luz, tomando uma pequena porção de potência óptica para fins de monitoramento. Quando um refere-se a acopladores, é costume descrevê-los em termos do número de portas de entrada e portas de saída no dispositivo. Por exemplo, a Figura 1 mostra um dispositivo com duas entradas e duas saídas é chamado de acoplador 2x2. Os dispositivos de acoplamento são projetados partir de fibras ópticas ou por meio de guias de ondas óticas planares usando materiais tal como niobato de lítio (LiNbO₃) ou InP (KEISER, 2003).

A interação da luz com as interfaces nas junções das fibras ópticas é o que causa a divisão do sinal óptico entre as diferentes portas. Essa divisão é baseada na proporção de luz que é transmitida e refletida em cada interface através da lei de Snell e das leis da reflexão. Alguns acopladores utilizam também efeitos de interferência óptica para controlar a divisão do sinal entre as portas. Os acopladores ópticos podem ser classificados em dois tipos principais: acopladores direcionais e acopladores não direcionais. Os acopladores direcionais possuem duas portas de entrada e duas portas de saída, enquanto os acopladores não direcionais possuem várias portas de entrada e saída.

O acoplador direcional com índice controlado pode ser utilizado como uma chave óptica. Variando os valores dos índices de refração dos guias, controla-se as potências das saídas do acoplador em porcentagens que variam entre 0 e 100 de forma complementar a cada saída, supondo nesse caso um acoplador 2x2, Figura 1. O divisor de feixe desempenha vários papéis em muitos aspectos da ótica. Por exemplo, em informação quântica, o divisor de feixe tem papéis essenciais no teletransporte, entrelaçamento e em estudos fundamentais do fóton. Os campos elétricos E_1 e E_2 entram nas portas de entrada 1 e 2, respectivamente. O campo 1 evolui como $E_1 = TE_3 + RE_4$, onde T e R são os coeficientes de transmissão e reflexão para o feixe divisor. Note que $|T|^2$ é a intensidade transmitida. Da mesma forma, $E_2 = RE_3 + TE_4$. A matriz

de transformação é então dada por: (JONES, 1995).

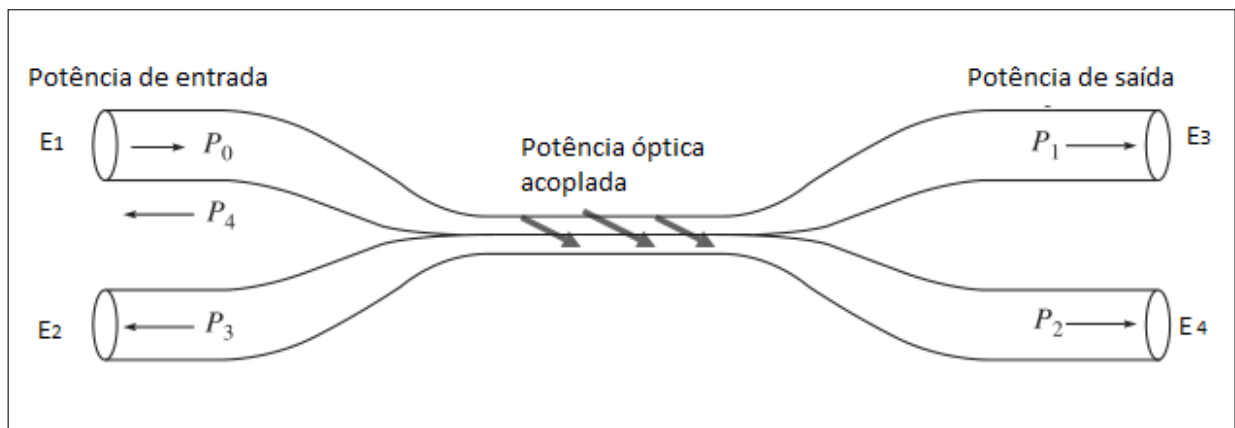
$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T & R \\ R & T \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_3 \\ E_4 \end{pmatrix}. \quad (2.1)$$

Os coeficientes de transmissão e reflexão são números complexos $T = |T|e^{i\theta}$ e $R = |R|e^{i\phi}$.

Para um divisor de feixe de 50/50 (significando metade de reflexão e metade de transmissão) a amplitude complexa é $\frac{1}{\sqrt{2}}$. A matriz divisora de feixe 50/50 é então dada por:

$$B = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

Figura 1 – Acoplador óptico.



Fonte: (YARIV, 2006)

Ao especificar o desempenho de um acoplador óptico, geralmente indica-se a divisão de porcentagem de potência óptica entre as portas de saída por meio da razão de divisão ou relação de acoplamento. Referindo-se à Figura 1, sendo P_0 a entrada potência e P_1 e P_2 as potências de saída, temos a razão de acoplamento de potência:

$$RA = \frac{P_2}{P_1 + P_2} \times 100\%. \quad (2.3)$$

Ajustando os parâmetros para que a potência seja dividida uniformemente, com a metade de potência de entrada para cada saída, cria-se um acoplador de 3 dB.

2.3.2 Fotodiodo PIN.

O fotodiodo PIN é um dispositivo semicondutor que é utilizado para a detecção de luz ou outras radiações eletromagnéticas. Ele consiste em uma estrutura de camadas finas de material semicondutor dopado de forma a criar uma região de alta resistência e baixa capacitância.

A estrutura do fotodiodo PIN é composta por três partes principais: uma camada de material semicondutor tipo P, uma camada intrínseca (i) e uma camada de material semicondutor tipo N. Nessa estrutura, a camada intrínseca é a região sensível à luz.

Quando a luz atinge a região intrínseca do fotodiodo, ela interage com os elétrons presentes no material e os transfere para a banda de condução, gerando assim um par elétron-lacuna. Os elétrons e lacunas gerados são recolhidos pelas regiões P e N, respectivamente, gerando assim uma corrente elétrica. Para aumentar a eficiência do fotodiodo, é comum adicionar uma camada anti-reflexiva na superfície superior do dispositivo. Essa camada ajuda a reduzir as perdas por reflexão, garantindo uma maior conversão de luz em corrente elétrica (MITSCHKE, 2016).

O resultado final é que a região intrínseca age como uma camada absorvente, convertendo a luz em pares de elétrons-lacuna que são separados pela ação do campo elétrico presente na estrutura do fotodiodo. Esses pares gerados foram migrados em direção às regiões de material semicondutor dopado, criando uma corrente elétrica que pode ser detectada e amplificada para produzir um sinal de saída.

Qualquer fotodiodo depende de uma junção p-n na qual a luz pode ser irradiada. Na junção, um fóton pode gerar um par de elétrons-buracos desde que $h\nu > E_{gap}$.

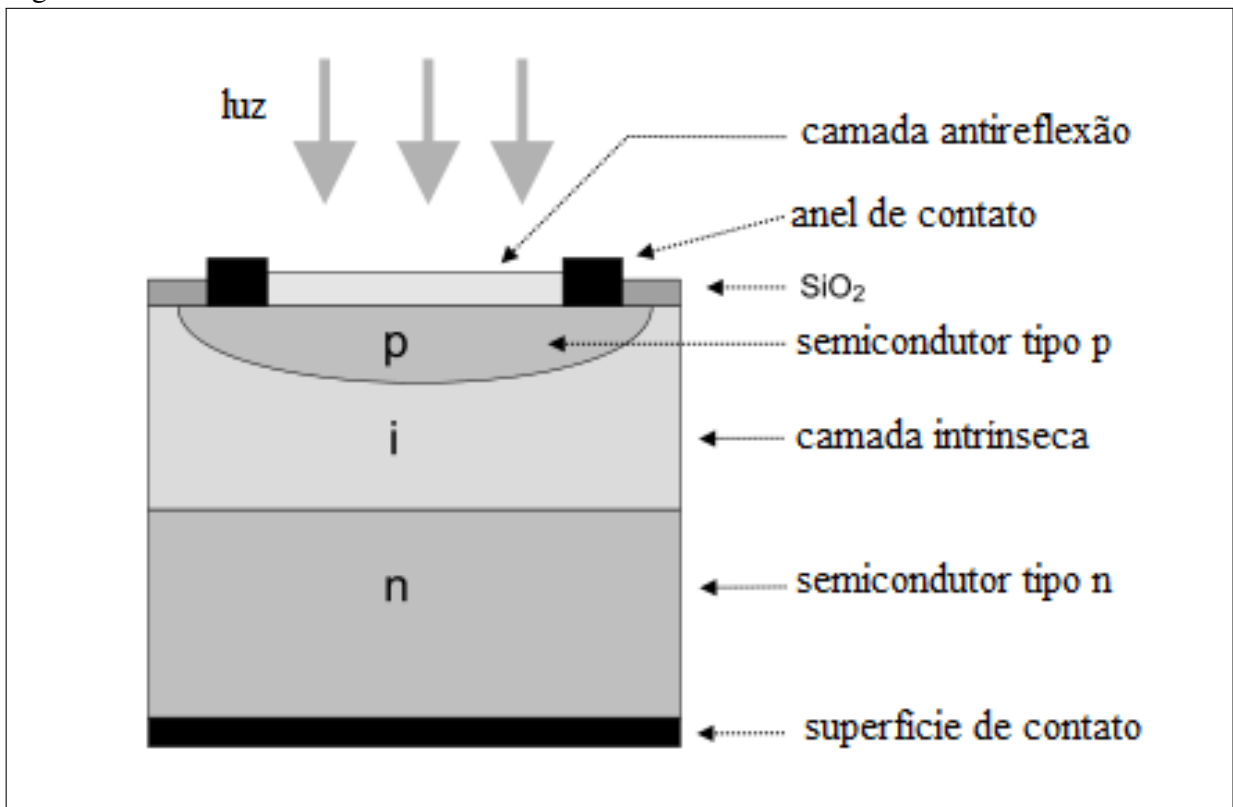
Sendo h a constante de Planck, ν é a frequência dos quanta de luz, e E_{gap} é o intervalo de banda energética entre valência e bandas de condução do material do detector. Em outras palavras, a energia do fóton deve exceder a banda gap. As cargas elétricas assim geradas podem então ser medidas como cargas externas, chamadas de fotocorrente. A corrente num fotodiodo é dada por (MITSCHKE, 2016):

$$I = I_0 \cdot \left(e^{\frac{eU}{mkT}} - 1 \right) - I_p. \quad (2.4)$$

Onde I é a corrente, U é a tensão, I_0 é uma corrente constante dada por o material e a temperatura, e é a carga de elétrons, $m \approx 1,5$ é conhecido como o fator Shockley, k é a constante de Boltzmann, e T é a temperatura (em Kelvin).

A equação difere da de qualquer diodo comum apenas no termo adicional para a fotocorrente. Os fotodiodos PIN melhoram a eficiência quântica onde uma camada intrínseca, indicada como *i*, é colocada entre o tipo *p* semicondutor e semicondutor tipo *n*. A Figura 2 mostra a estrutura de um PIN. A luz entra através de um anti-camada flexível que ocupa a abertura livre dentro do anel de contato. O restante da superfície do chip é passivado com SiO_2 e a absorção ocorre principalmente na camada *i* (MITSCHKE, 2016).

Figura 2 – Fotodetector PIN.



Fonte: (MITSCHKE, 2016)

Os fotodiodos são caracterizados através da sua sensibilidade (às vezes chamada de responsividade), \mathfrak{R} é uma quantidade importante:

$$\mathfrak{R} = \frac{I_f}{P_f} = \frac{n_e e}{n_p h\nu} = \frac{\eta e}{h\nu}. \quad (2.5)$$

Aqui n_e e n_p indicam o número por segundo de elétrons ou fótons, respectivamente e η a eficiência quântica.

2.3.3 Laser.

LASER é um acrônimo para amplificação de luz por emissão estimulada de radiação. A história do laser começou em 1917 com a teoria do físico Albert Einstein sobre a emissão

estimulada de radiação. Em 1951, surgiram os primeiros dispositivos de maser - micro-ondas de amplificação por emissão estimulada de radiação.

Em 1958, o físico americano Charles Townes construiu o primeiro laser - feixe de luz coerente - utilizando um cristal de rubi como meio ativo. A palavra laser foi criada pela sigla em inglês que significa Emissão de Luz Amplificada por Radiação Estimulada.

Nos anos seguintes, foram desenvolvidos outros tipos de lasers, como o de hélio-neon, o de dióxido de carbono e o de argônio. Na década de 1970, surgiram os lasers de pulsos ultracurtos e de alta intensidade, tornando possível a investigação em áreas como física e química.

Na década de 1980, houve um avanço significativo no uso do laser em aplicações médicas e cirúrgicas, como a correção da visão com LASIK, remoção de tatuagens, tratamento de varizes e remoção de pelos. Nos anos 90, o laser de fibra foi inventado, permitindo a transmissão de alta velocidade da internet por meio de cabos de fibra ótica. Na década de 2000, os lasers de alta potência se tornaram muito úteis na indústria, permitindo cortes precisos e eficientes em metais.

Em 2013, o Prêmio Nobel de Física foi concedido a François Englert e Peter Higgs pela descoberta do bóson de Higgs, que foi confirmado com a ajuda de um grande colisor de partículas e um poderoso laser.

Em 2018, o laser mais poderoso do mundo, o Laser MegaJoule, foi inaugurado na França, com a capacidade de simular explosões nucleares para pesquisas sobre energia nuclear. No mesmo ano, um laser de pulso rápido foi usado para produzir o primeiro buraco negro artificial em um laboratório.

Em 2019, a primeira comunicação de laser ponto a ponto entre Terra e a Lua foi realizada com sucesso, usando um laser de alta potência. Além disso, foram desenvolvidas novas técnicas de processamento de materiais, como a impressão 3D usando laser, o que permite a produção de objetos complexos e precisos.

Em 2020, foram anunciados avanços promissores na busca por fusão nuclear controlada, utilizando lasers pulsados em dispositivos conhecidos como *tokamaks*. Também foram desenvolvidos lasers de raios-X em escala nanométrica, que permitem a observação de processos ultra-rápidos em materiais (BERTOLOTTI, 2015).

O laser é um dispositivo que produz luz com características especiais, como coerência, mono-cromaticidade e direcionalidade. O funcionamento do laser é baseado no princípio de emissão estimulada de radiação eletromagnética. A emissão estimulada é um processo físico

pelo qual um átomo ou molécula excitado pode emitir um fóton quando estimulado por um outro fóton com a mesma energia e fase. O processo de emissão de luz por átomos e moléculas ocorre quando os elétrons nos átomos ou moléculas saltam de um nível de energia mais alto para um nível mais baixo, emitindo um fóton na forma de luz. Isso é conhecido como emissão espontânea, e ocorre de forma aleatória e em todas as direções. Já na emissão estimulada, um fóton externo estimula um átomo ou molécula já excitados a emitir um fóton idêntico em energia, direção e fase ao fóton incidente. Como resultado, dois fótons idênticos são emitidos com a mesma direção e fase, aumentando a intensidade da luz.

O processo de emissão estimulada é baseado no princípio da conservação de energia e *momentum*. O fóton incidente fornece a energia necessária para excitar o átomo ou molécula, permitindo que um elétron salte para um nível de energia mais alto. Quando esse elétron retorna ao nível de energia mais baixo, um fóton é emitido. O fóton emitido é idêntico ao fóton incidente, e ambos têm a mesma energia, direção e fase.

Esse processo de emissão estimulada é fundamental para o funcionamento dos lasers, que utilizam esse processo para produzir luz coerente. O meio ativo de um laser é bombeado para excitar átomos ou moléculas a um estado excitado. Quando um fóton com a mesma energia e fase do fóton emitido pelo átomo é enviado para o meio ativo, ocorre a emissão estimulada, produzindo um fóton adicional do mesmo comprimento de onda e fase. Esse processo contínuo de emissão estimulada amplifica e gera a luz coerente que é direcionada pelo ressonador óptico.

O laser é composto por três componentes principais: o meio ativo, o sistema de bombeamento e o ressonador óptico. O meio ativo é o material que é excitado pelo sistema de bombeamento, gerando a emissão estimulada da radiação. O sistema de bombeamento é utilizado para excitar o meio ativo, fornecendo energia para que ocorra a emissão estimulada. O ressonador óptico é um dispositivo que permite que a radiação gerada pelo meio ativo seja amplificada e direcionada.

Existem diversos tipos de lasers, que diferem principalmente pelo meio ativo utilizado. Alguns exemplos são (MAINI, 2013):

- Laser de gás: utiliza um gás como meio ativo, como o hélio-neônio (HeNe) ou o dióxido de carbono (CO₂). O laser de gás é um tipo de laser que utiliza um gás como meio ativo para produzir a emissão estimulada de radiação. Os gases mais comuns usados como meio ativo em lasers de gás são o hélio-neônio (HeNe) e o dióxido de carbono (CO₂).

O princípio de funcionamento do laser de gás baseia-se na excitação do meio ativo

com energia externa para produzir emissões de radiação coerentes. Quando um gás é excitado por uma descarga elétrica de alta voltagem ou por outra fonte de energia externa, os átomos no gás absorvem energia e passam para um estado de energia mais elevado. Esses átomos excitados emitem então radiação quando voltam a seu estado de energia mais baixo.

O processo físico que gera a luz coerente começa com o bombeamento do meio ativo. Quando átomos ou moléculas são excitados, seus elétrons podem saltar para um nível de energia mais alto. Quando esses elétrons voltam para o nível de energia inicial, eles emitem energia na forma de fótons. Esse processo de emissão estimulada ocorre quando um fóton incidente no átomo ou molécula estimula um elétron a emitir um segundo fóton com a mesma direção e fase do primeiro fóton.

A luz coerente é a luz que tem uma amplitude e fase constantes em todo o espaço e tempo. Isso é possível porque a emissão estimulada gera fótons que são todos iguais em frequência, fase e direção. O ressonador óptico do laser é projetado para permitir que a luz coerente seja amplificada e direcionada em uma única direção, produzindo um feixe estreito de luz de alta intensidade (GHATAK, 2009).

O laser de gás utiliza um sistema de espelhos para refletir repetidamente a radiação emitida pelo meio ativo através de uma cavidade laser. O feixe de luz produzido é altamente coerente e monocromático, com uma largura de banda muito estreita.

O tamanho da cavidade laser e o comprimento de onda da radiação emitida pelo meio ativo determinam a potência, a coerência e a direção do feixe de laser produzido. Os lasers de gás têm aplicações em áreas como medicina, ciência e indústria, incluindo a fabricação de instrumentos de precisão, medição de distância a laser e corte a laser em materiais duros (HITZ *et al.*, 2004).

- Laser de estado sólido: utiliza um material sólido como meio ativo, como o rubi ou o Nd:YAG. que é um tipo de laser que utiliza um cristal de YAG (granada de ítrio e alumínio) dopado com ítrio e neodímio (Nd) como meio ativo. Esse laser é muito conhecido e utilizado em diversas aplicações, como na medicina (por exemplo, em cirurgias a laser), na indústria (por exemplo, em soldagem e corte de metais) e na pesquisa científica.

O neodímio é um elemento químico que pode ser usado para dopar o cristal de YAG e substituir alguns átomos de ítrio. Isso cria "sítios ativos" no cristal que permitem a geração de luz coerente. Quando um feixe de luz é refletido em um cristal de Nd:YAG, ele é amplificado pelo sítios ativos e emerge do outro lado como um feixe de laser altamente coerente e direcionado.

O Nd:YAG é geralmente bombeado por outra fonte de laser, geralmente um laser de diodo, que produz a energia necessária para excitar os elétrons no cristal de YAG e gerar a emissão estimulada. A luz gerada pelo Nd:YAG tem um comprimento de onda de 1064 nanômetros, o que o torna adequado para aplicações que requerem alta potência e capacidade de penetrar em tecidos ou materiais densos (HITZ *et al.*, 2004).

- Laser de semicondutor: utiliza um material semicondutor como meio ativo, como o diodo laser.

O laser de semicondutor é um tipo de laser que utiliza um material semicondutor, geralmente um diodo laser, como meio ativo para produzir um feixe de luz altamente coerente e concentrado. O processo de funcionamento é baseado na emissão estimulada de fótons em um meio de ganho excitado eletronicamente.

O meio ativo em um laser de semicondutor é um material semicondutor dopado de uma forma específica para criar uma junção p-n, que gera uma região de alta densidade de portadores de carga (elétrons e lacunas). Quando uma fonte de energia é aplicada no cristal semicondutor, os elétrons na banda de condução são estimulados a transitar para a banda de valência inferior, liberando assim fótons com um comprimento de onda particular e coerente. As propriedades de emissão do feixe de luz produzido são determinadas pelas características do semicondutor usado como meio ativo.

O diodo laser é o tipo mais comum de laser de semicondutor. Ele consiste em uma junção p-n formada por camadas de materiais semicondutores diferentes, como o arseneto de gálio (GaAs) e o fosfeto de índio (InP), que são juntados em uma estrutura de cavidade para formar um guia de onda óptica. O guia de onda orienta o feixe de luz em direção à saída do diodo laser, que é frequentemente coberto por uma lente para aumentar a eficiência do acoplamento de luz com a fibra.

Os diodos laser de semicondutor são amplamente utilizados em aplicações comerciais e industriais, incluindo telecomunicações, gravação óptica, leitura de código de barras, iluminação eletroluminescente, detecção remota e instrumentação médica. Esses lasers destacam-se pela sua alta eficiência, tamanho compacto, baixo consumo de energia e tempos rápidos de chaveamento. Além disso, sua capacidade de ser integrado em circuitos eletrônicos torna-os uma escolha preferida para aplicações de alta velocidade e comunicação digital (HITZ *et al.*, 2004)(MAINI, 2013).

Os tipos de laser mais utilizados em circuitos fotônicos são o laser de diodo (LD) e o

laser semiconductor de cavidade vertical (VCSEL).

O LD é amplamente utilizado em comunicações ópticas de longa distância, sistemas de armazenamento óptico e leitores de códigos de barras. Ele é preferido por seu tamanho compacto, alta eficiência, confiabilidade, baixo custo e sua capacidade de produzir luz em uma ampla gama de comprimentos de onda. Já o VCSEL é utilizado em sensores de proximidade, leitores de impressão digital, aplicações biomédicas e na transmissão de dados de rede local (LAN), principalmente devido à sua capacidade de modular a frequência e a taxa de dados, além de uma emissão de luz mais direcional e uniforme. Além disso, os VCSELs podem ser fabricados em grandes quantidades por um processo de litografia, resultando em custos de produção mais baixos em comparação com os outros tipos de lasers.

Ambos os tipos de laser possuem excelentes características de desempenho em termos de largura de banda, modulação eletro-óptica, tempo de vida útil e taxa de erro de bit (BER), o que os torna ideais para uso em circuitos fotônicos.

2.3.4 Modulador de fase

Diodos emissores de luz (LEDs) e lasers com polarização de corrente constante emitem luz de onda contínua (CW) com potência óptica média constante. Para transmitir informações, é necessário modular a fonte de luz mudando sua amplitude e/ou fase. A modulação de luz pode ser interna (direta) ou externa (indireta). A modulação direta é baseada na modulação do ponto de polarização instantâneo da fonte de luz (LED ou laser); a solução é compacta, pois nenhum dispositivo externo adicional é necessário, mas tem uma taxa de extinção pior e um *chirp* mais alto (ou seja, modulação espúria de frequência associada à modulação de intensidade) do que os esquemas de modulação indireta. A largura de banda de modulação é muito limitada (abaixo de 1 Gbps) em LEDs, muito mais ampla (até 10 Gbps no campo) para lasers. A modulação externa (indireta) requer um dispositivo adicional acionado por tensão (às vezes grande e embalado separadamente), o modulador de luz, que age como uma chave de luz. As vantagens são uma taxa de extinção mais alta, um *chirp* mais baixo (idealmente zero em alguns dispositivos) e uma taxa de bits mais alta (acima de 40 Gbps). Várias soluções existem para a modulação externa; os dispositivos de escolha hoje são o modulador eletro-óptico (EOM) e o modulador de eletroabsorção (EAM). Tanto EAMs quanto EOMs são capazes de alcançar operação de alta velocidade; dispositivos comercialmente disponíveis existem para sistemas de 40 Gbps (GHIONE, 2009).

Um modulador de fase óptico é um componente óptico que altera seletivamente a fase da luz incidente, de modo a modificar um vários parâmetros do sinal óptico, como amplitude, frequência, polarização e/ou fase. O funcionamento desses dispositivos é baseado no efeito *Pockels* ou efeito eletro-óptico, que consiste na variação linear da birrefringência de um meio material, quando submetido a um campo elétrico externo. Essa variação induz uma mudança na fase da onda óptica que atravessa o meio, em proporção ao campo elétrico aplicado.

Existem vários tipos de moduladores de fase óptica, cada um com suas próprias características e aspectos construtivos. Alguns exemplos são (JONES, 1995):

- Moduladores de fase baseados no efeito *Pockels* externo: Esses dispositivos possuem um cristal opticamente anisotrópico (por exemplo, o LiNbO_3), no qual o campo elétrico é aplicado em uma direção perpendicular ao feixe óptico. A mudança na birrefringência induz uma variação linear na fase do sinal, podendo ser utilizados em modulação de amplitude e frequência, bem como em multiplexação óptica. Um dos exemplos mais comuns é o modulador de fase de cristal de lítio niobato (LiNbO_3) ou lítio tántalo (LiTaO_3), que é usado em comunicações ópticas, medições interferométricas, processamento de sinais ópticos, entre outras aplicações (DRAGOMAN, 1999).

Além disso, há também os moduladores de fase de cristal de bismuto germanato ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), que são usados em sistemas de comunicações ópticas, moduladores de imagem, holografia, astronomia óptica e outras aplicações ópticas. Esses moduladores utilizam campos elétricos externos para alterar a birrefringência do cristal, o que permite a alteração da fase da luz (DRAGOMAN, 1999).

Outra categoria interessante são os moduladores de fase eletro-ópticos de polímero, que são feitos de camadas finas de polímero eletroativo. Nesses dispositivos, a aplicação de um campo elétrico externo muda a birrefringência do polímero, o que, por sua vez, gera a alteração da fase da luz que passa por ele. Esse tipo de modulador é utilizado em dispositivos de comunicações ópticas, processamento de sinais ópticos, dispositivos de modulação de luz, entre outras aplicações.

Por fim, os moduladores de fase de fluorita de cálcio (CaF_2) também merecem destaque. Esse tipo de modulador é utilizado em sistemas de comunicações ópticas, moduladores de imagem, estudos de coerência óptica, entre outros. Similarmente aos outros moduladores de fase baseados no efeito *Pockels*, os moduladores de CaF_2 requerem um campo elétrico externo para alterar a birrefringência do cristal, possibilitando a alteração da fase da luz que passa por

ele.

- Moduladores de fase baseados no efeito *Kerr*: Esses dispositivos utilizam um meio com susceptibilidade óptica não-linear, que gera um campo elétrico auto-focalizante quando submetido a um feixe óptico intenso. A mudança na fase é induzida pela modificação do índice de refração do meio, proporcional à intensidade do sinal óptico incidente. Esses moduladores são utilizados em sistemas de comunicação de alta velocidade e em processamento de sinal óptico.

- Moduladores de fase baseados em deformação mecânica: Esses dispositivos induzem uma deformação mecânica em um material (por exemplo, um filme polimérico ou metálico), quando submetido a um campo elétrico ou magnético. Essa deformação resulta em uma variação na distância óptica percorrida pelo sinal, alterando a fase e/ou a polarização. Esses moduladores são utilizados em sistemas de displays ópticos (DRAGOMAN, 1999).

- Moduladores de fase holográficos: Esses dispositivos são baseados em materiais foto-refrativos, que possuem a capacidade de registrar padrões de interferência óptica na forma de um holograma. O padrão pode ser modificado aplicando um campo elétrico externo, o que altera as propriedades ópticas do material, permitindo a modificação da fase e/ou polarização do sinal. Esses moduladores são utilizados em aplicações de difração óptica e processamento de imagens.

Em termos gerais, a construção dos moduladores de fase óptica envolve a utilização de materiais opticamente ativos, eletro-óticos, não-lineares ou foto-refrativos, que são incorporados em uma configuração opto-mecânica, com eletrodos e conectores elétricos para controle do campo elétrico aplicado. Alguns aspectos construtivos podem variar de acordo com o tipo de modulador, como a geometria do cristal, o tipo de suporte mecânico, a distância entre os eletrodos, a orientação do campo elétrico, entre outros (DRAGOMAN, 1999; JONES, 1995).

2.4 Técnicas de geração de harmônicas

2.4.1 Geração de micro-ondas por detecção heteródina

A geração de sinais de micro-ondas a partir de sistemas ópticos, dividem-se em duas técnicas: A mixagem de duas ondas ópticas de diferentes frequências usando heterodinagem, através da detecção do sinal óptico, previamente modulado em intensidade na saída de um fotodiodo e geração de sinais de micro-ondas.

Componentes de frequência pode ser geradas pelo batimento de duas ondas ópticas

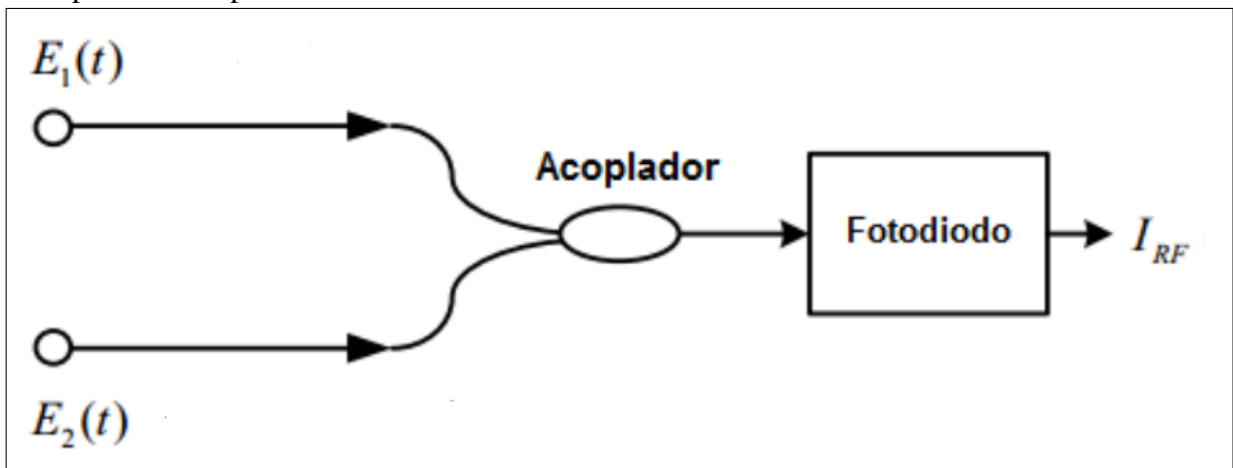
em um fotodiodo, caracterizando um processo heteródino, ou seja, a mixagem de duas ondas, sendo este, basicamente um processo de multiplicação de sinal (YAO, 2010). Nesse caso particular de geração de micro-ondas, dois feixes ópticos com frequências relativamente próximas uma da outra, são combinadas gerando novas frequências, um resultado geralmente da diferença e da soma entre as frequências primitivas, no caso de batimento.

Na heterodinagem, sinais de frequências diferentes são observados na saída de um dispositivo, devido ao batimento de outros sinais de entrada de um dispositivo opto-eletrônico. Logo, processo heteródino é aquele onde ocorre a mixagem de dois sinais de diferentes frequências em um sistema não linear, implicando no surgimento de novas frequências na saída do dispositivo. Heterodinagem torna o batimento de frequências uma realidade física nos sistemas não lineares (PROTOPOPOV, 2009).

Na Figura 3 é apresentado um sistema óptico para geração de um sinal de micro-ondas a partir do batimento de duas portadoras ópticas (CAPMANY; NOVAK, 2007).

Duas ondas ópticas, E_1 e E_2 , com frequências próximas entre si, são combinadas no acoplador óptico.

Figura 3 – Sistema óptico para geração de um sinal de micro-ondas a partir do batimento de duas portadoras ópticas.



Fonte: (YAO, 2010)

Sendo ω_1 e ω_2 as frequências angulares das ondas descritas e ϕ_1 e ϕ_2 as fases iniciais, aleatórias decorrentes dos ruídos de fase de cada uma e considerando o campo elétrico resultante da interação das ondas na saída do acoplador óptico (YAO, 2010):

$$E(t) = E_1(t) + E_2(t) \quad (2.6)$$

e considerando que:

$$E_1(t) = \hat{\mathbf{e}}_1 E_1 e^{j(\hat{\mathbf{k}}_1 z - \omega_1 t + \phi_1)} \quad (2.7)$$

e

$$E_2(t) = \hat{\mathbf{e}}_2 E_2 e^{j(\hat{\mathbf{k}}_2 z - \omega_2 t + \phi_2)}, \quad (2.8)$$

logo:

$$E(t) = \hat{\mathbf{e}}_1 E_1 e^{j(\hat{\mathbf{k}}_1 z - \omega_1 t + \phi_1)} + \hat{\mathbf{e}}_2 E_2 e^{j(\hat{\mathbf{k}}_2 z - \omega_2 t + \phi_2)}. \quad (2.9)$$

Então, a corrente na saída do fotodiodo é (PROTOPOPOV, 2009):

$$I_{RF} = \Re P_{opt}. \quad (2.10)$$

onde \Re é a responsividade do fotodiodo que caracteriza sua performance em termos da fotocorrente gerada por potência óptica incidente num dado comprimento de onda e P_{opt} é a potência óptica da luz incidente sobre o fotodiodo que é proporcional ao módulo do campo elétrico total, logo:

$$P_{opt} = \frac{A}{2} c \epsilon_0 |E(t)|^2. \quad (2.11)$$

para c a velocidade da luz ϵ_0 a permissividade do meio e A área ativa do fotodiodo. Substituindo (2.10) em (2.11), temos:

$$I_{RF} = \Re \frac{A}{2} c \epsilon_0 |E(t)|^2. \quad (2.12)$$

Então, a corrente detectada após a filtragem das componentes DC do campo, é dado por (YAO, 2010; HILT, 2016):

$$I_{RF} \approx 2\Re \sqrt{P_1 P_2} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2)]. \quad (2.13)$$

Como podemos observar na Equação 2.13, o sinal na saída do fotodiodo é dado pela diferença entre as frequências $\omega_1 - \omega_2$ das ondas ópticas de entrada no acoplador óptico.

Essa técnica é capaz de gerar micro-ondas na faixa de Giga-Hertz quando usado um sistema óptico, sendo limitada apenas pela largura de banda do fotodiodo, o contraponto dessa

técnica é uma alta concentração de ruído de fase que se caracteriza pelo termo $(\phi_1 - \phi_2)$, que é o ruído que descreve a instabilidade de frequência de curto prazo de um instrumento de RF (CAPMANY; NOVAK, 2007).

O ruído de fase é aquele relacionado às pequenas diferenças instantâneas na fase do oscilador local, nesse caso o Laser, e resulta em sinais indesejados em frequências adjacentes à frequência portadora, quando uma fonte transmissora gera um sinal que deve-se transmitir, os componentes usados não são absolutamente lineares, o que quer dizer que não temos a produção de um sinal perfeito e nem ao menos de forma absolutamente sincronizada. Significando que as pequenas diferenças entre as fases dos sinais gerados a cada instante podem modular a onda portadora, gerando faixas de sinal emitidas juntamente com ela mesma.

Tais sinais concentram-se nas faixas de frequência próximas da portadora ou da frequência de saída transmissor. Uma solução para a diminuição do ruído de fase, ou seja, manter constante a diferença de frequência é a utilização de várias técnicas de controle, entre elas: Travamento de fase por injeção óptica e travamento de fase por injeção óptica por *loop*.

A geração de micro-ondas com baixo ruído de fase através de travamento de injeção óptica se dá através do batimento de dois sinais ópticos na região ativa de um fotodetector, usado para sincronizar as fases, diminuindo assim o ruído de fase. Essa técnica baseia-se no fenômeno observado por Christian Huygens (1629-1695).

Huygens observou que os pêndulos de dois relógios presos a uma mesma parede, em determinado momento sincronizavam-se, ele constatou que um dos relógios propagava pequenas vibrações mecânicas ao outro relógio através da parede, esse efeito, injetava perturbações no pêndulo, e por conta disso, gerava uma sincronia (travamento) de frequência e fase entre ambos os pêndulos. É então a base da correção do ruído de fase na geração óptica de sinais de micro-ondas, usando técnicas de controle, ou seja, sincronismo entre uma configuração de laser mestre-escravo, com o propósito de realizar um sincronismo dos termos de fase. Para que um travamento de fase seja possível, devem ser escolhidos dois lasers com largura de linha estreita e que também apresentem flutuação de fase apenas em baixas frequências (LEE, 2013).

No método de Travamento de fase por injeção óptica, a diferença constante de fase é conseguida através de um laser mestre que é modulado com uma frequência fixa num gerador de RF, então a saída deste é injetada na cavidade de dois outros lasers, chamados escravos e como consequência, eles sincronizam a fase entre si em relação a fase do laser mestre e através do batimento entre os próprios sinais, há então a possibilidade de geração de um sinal de micro-

ondas mais coerente através do batimento das ondas ópticas pela diminuição de frequências parasitas alocadas na vizinhança das frequências geradas na heterodinagem, consequência direta do já citado ruído de fase. Como a razão entre as fases dos lasers escravos é constante, o sinal gerado no fotodetector apresenta baixo ruído de fase (LEE, 2013).

2.4.2 *Geração de micro-ondas por modulação de externa de intensidade.*

O método de modulação de intensidade externa, gera uma conversão de sinais na faixa de micro-ondas é baseado no acoplamento do sinal RF à portadora óptica. Técnicas de geração de RF através de modulação externa são empregadas com a característica de multiplicar a frequência do sinal modulado.

Após a transmissão através da fibra e detecção direta no fotodiodo PIN, a corrente resultante produzirá um sinal de frequência igual àquela de micro-ondas. A modulação direta do laser tem sido utilizada para aplicações de telecomunicações em micro-ondas. O uso de moduladores Mach-Zehnder é mais promissor pois são dispositivos que comportam amplas larguras de banda com baixas tensões de polarização (LEE, 2013).

O esquema de geração resume-se na modulação de um sinal através de um modulador de intensidade onde são detectadas as frequências de batimento na saída de um fotodiodo. A multiplicação da frequência em relação àquela que foi modulada dependerá exclusivamente dos parâmetros configurados no modulador óptico, no caso, usa-se um modulador *Mach-Zehnder*.

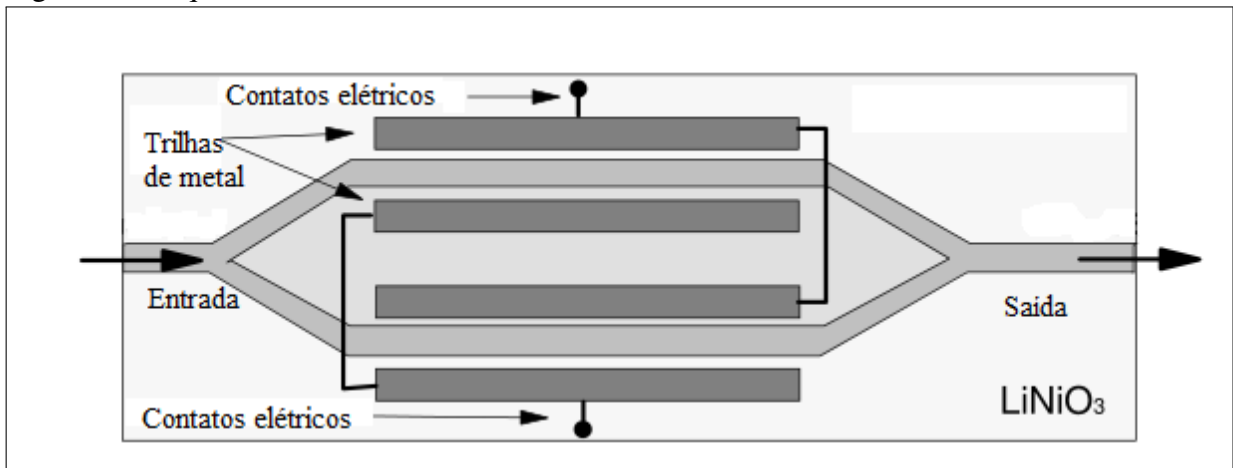
Moduladores MZ geralmente utilizam o efeito eletro-óptico para conseguir a modulação da luz, que é geralmente definido como a mudança do índice de refração dentro de um guia óptico num cristal anisotrópico, quando um campo elétrico externo é aplicado. Se o índice de refração muda linearmente com a amplitude do campo aplicado, este é conhecido como efeito eletro-óptico linear ou efeito Pockels. Este é o efeito físico mais amplamente usado por os moduladores em guias de onda (DUTTON, 1998).

Comumente, o material niobato de lítio (LiNbO₃ - cristal fotorrefrativo) é usado para a fabricação destes moduladores. Em geral, uma estrutura de tipo interferômetro de Mach-Zehnder é usado nos moduladores baseados em niobato de lítio.

Moduladores de intensidade *Mach-Zehnder*, Figura 4, usam a interferência entre dois feixes de luz que propagam-se através de caminhos diferentes e combinam-se em uma porta comum de saída.

Se a luz que ingressa é dividida igualmente entre os guias de onda, E_A e E_B , e uma

Figura 4 – Esquema do modulador Mach-Zehnder.



Fonte: (DUTTON, 1998)

voltagem é aplicada, este muda a fase da onda que se está propagando nesse braço; e quando a voltagem aplicada, V , iguala a voltagem requerida para alcançar uma mudança de fase de π radianos (ou múltiplo ímpar), V_π , as ondas que saem do interferômetro têm a mesma amplitude, mas uma diferença de fase de π . Então a potência óptica de saída é zero por interferência destrutiva. Este tipo de distribuição de campo pertence a um modo de maior ordem que o menor modo excitado na guia de entrada cuja distribuição de campo é uniforme. Como a dimensão do guia de saída é projetada tal que modos de maior ordem não propaguem, não há saída. Se o guia de saída for mais espesso, o cancelamento total poderia não ocorrer (MARPAUNG *et al.*, 2013).

Mediante a comutação "on" e "off" de uma voltagem aplicada, V e V_π , respectivamente, o dispositivo comuta "on" e "off" na potência óptica. Para os valores de voltagem entre V e V_π , a potência varia como (IIZUKA, 2013):

$$I_{sada} = \frac{I_{entrada}}{2} [1 + \cos(\Delta\phi)] = I_{entrada} \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right). \quad (2.14)$$

onde o ângulo $\Delta\phi$ é a diferença de fase entre a luz controlada e a luz não controlada em cada braço, respectivamente. O valor para a mudança de fase $\Delta\phi$ é obtida do equacionamento do efeito eletro-óptico *Pockles*, onde o referido valor é proporcional à voltagem aplicada, cuja expressão é (IIZUKA, 2013):

$$\Delta\phi = \frac{\pi V}{V_\pi}. \quad (2.15)$$

Assim, a potência óptica será:

$$I_{sada} = I_{entrada} \cdot \cos^2\left(\frac{\pi V}{2V_\pi}\right). \quad (2.16)$$

Em modulação externa usa-se DSB (double side-band), através da multiplicação da frequência do sinal modulado, baseado na característica de geração de bandas laterais de harmônicas superiores a da portadora óptica, nessa técnica de modulação (YAO, 2010).

Porém com a característica de geração de micro-ondas, surge como desvantagens a presença de componentes espectrais indesejadas, conduzindo a necessidade de utilização filtragem, além disso, há a duplicação da banda utilizada pelo sinal.

Pode-se gerar então, componentes de frequências, através dessa técnica, que correspondem ao dobro ou ao quádruplo da frequência do sinal injetado no modulador óptico. Na Equação 2.14 vemos a função representativa da intensidade do campo elétrico na saída do sistema, a tensão de polarização no modulador é configurada para o ponto de mínima transmissão da potência óptica de saída, há a obtenção do dobro da frequência modulada, mas se a tensão de polarização é configurada para o ponto de máxima transmissão da potência, temos na saída do fotodiodo um sinal cuja frequência corresponde ao quádruplo da frequência no sinal modulado (YAO, 2010).

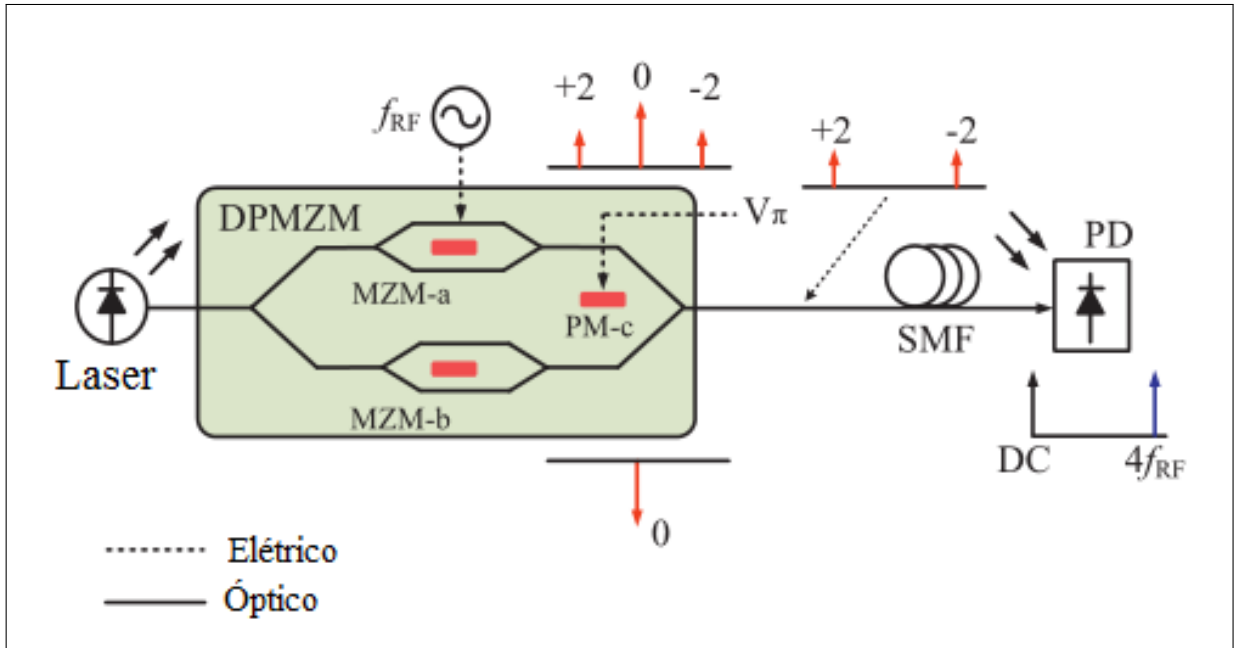
Dessa forma, surgem variações do método de geração de micro-ondas através de modulação externa, particularmente com uso de sistemas com modulador *Mach-Zehnder*, fotodiodo e fibra monomodo (SMF), certas configurações usam dois moduladores cascadeados ou de braços duplos paralelos.

No artigo de (ZHOU *et al.*, 2013) , propõe-se a quadruplicação de um sinal modulado usando um modulador *Mach-Zehnder Dual Parallel*, trata-se de três moduladores *Mach-Zehnder Modulator* (MZM) e um modulador de fase , dois deles compactados cada qual em um dos braços de um MZM maior, Figura 5.

Essa configuração tem como vantagem principal a retirada do filtro óptico do sistema, necessário para supressão da frequência do sinal portador, presente no sistema mais simples anteriormente discutido.

O cancelamento da portadora acontece porque a presença do modulador de fase na saída do modulador *Mach-Zehnder* principal, Figura 5, conduz a um total cancelamento das portadoras de sinais dos moduladores em cada braço, através do ajuste da tensão de polarização que conduza a uma diferença de fase no modulador de fase (PM) de π entre os campos de saída. Segundo (ZHOU *et al.*, 2013), resultados experimentais utilizando um sinal de 10 GHz e potência de 22 dBm foram eficientes na obtenção de outro sinal de frequência de 40 GHz, não sendo porém eficiente na obtenção das bandas laterais de primeira e terceira ordem . Vemos na

Figura 5 – Sistema óptico para multiplicação de um sinal de micro-ondas a partir de um modulador *Mach-Zehnder Dual Parallel*.



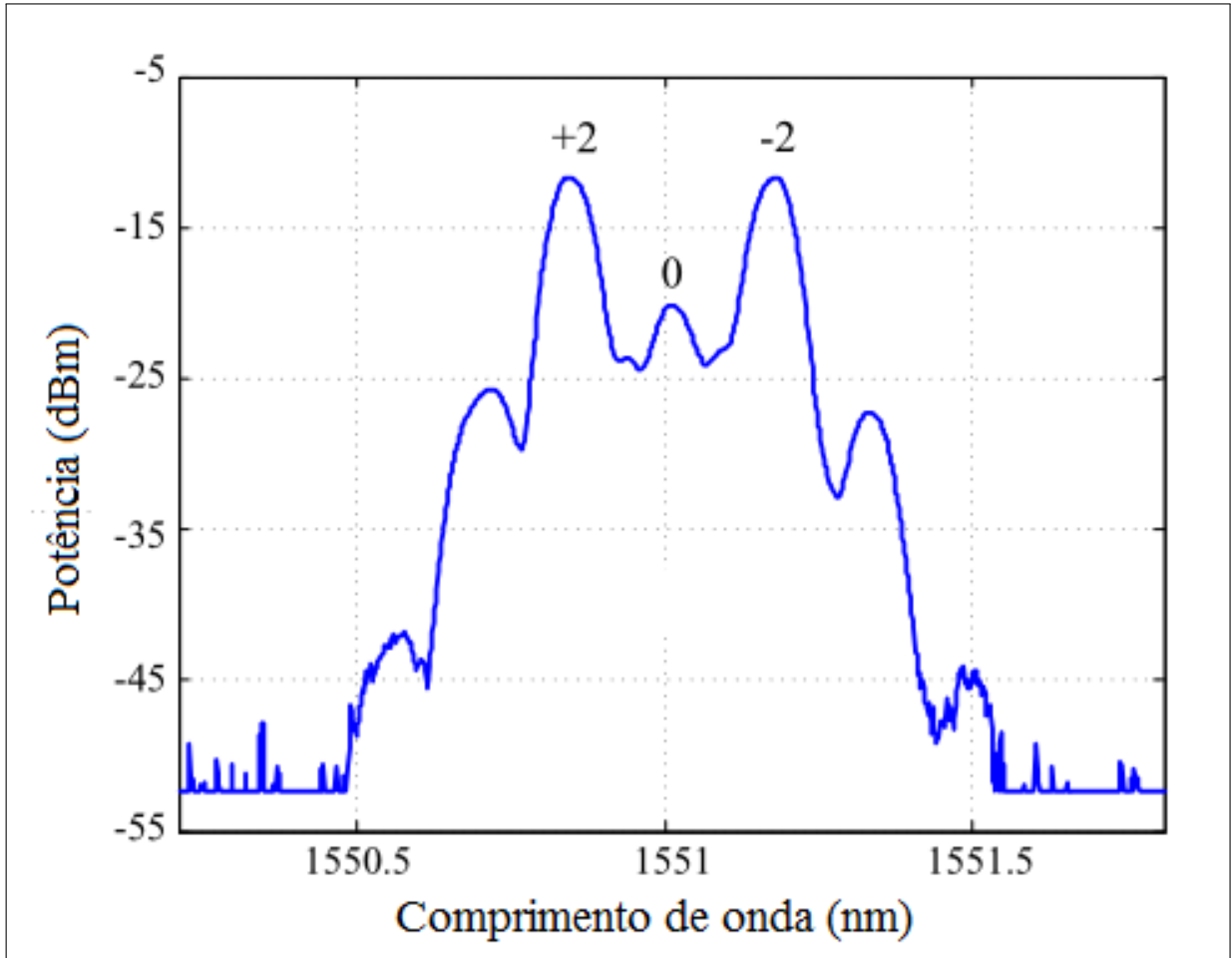
Fonte: (ZHOU *et al.*, 2013)

Figura 6, pelo espectro de potência da saída, o resultado da multiplicação através do batimento das duas de componentes harmônicas de segunda ordem no fotodiodo (PD) e da supressão da frequência portadora.

Outro sistema de quadruplicação de frequência é também proposta por (ZHANG *et al.*, 2007b), nessa configuração usa-se dois moduladores *Mach-Zehnder* cascadeados e modulados por um sinal elétrico amplificado no segundo modulador amplificador de potência (PA) além da presença de um deslocador de fase (PS) neste último, Figura 7.

Nessa configuração, um sinal é aplicado na entrada do primeiro modulador que é previamente polarizado através do controlador de polarização (PC) de modo a suprimir a portadora e as frequências das bandas laterais de ordem par. Como resultado desse primeiro estágio de modulação, o experimento obtém a portadora duplicada coerentemente, diminuindo assim o ruído. No segundo estágio, os sinais coerentes são injetados no segundo modulador que também é polarizado de modo a suprimir a portadora e as frequências das bandas laterais pares, na saída do segundo modulador, o sinal da portadora passa pelo amplificador óptico (OSA) e o resultado na saída do sistema é a presença de dois pares de componentes de frequências, separadas os pares, pela diferença de fase imposta pelo deslocador de fase (PS) e ambas possuindo o espectro de frequência obtido através de batimento, quatro vezes o valor do sinal configurado na entrada do sistema cascadeado, podemos perceber isso observando a Figura 8, captada pelo

Figura 6 – Espectro óptico do sistema com DPMZM.



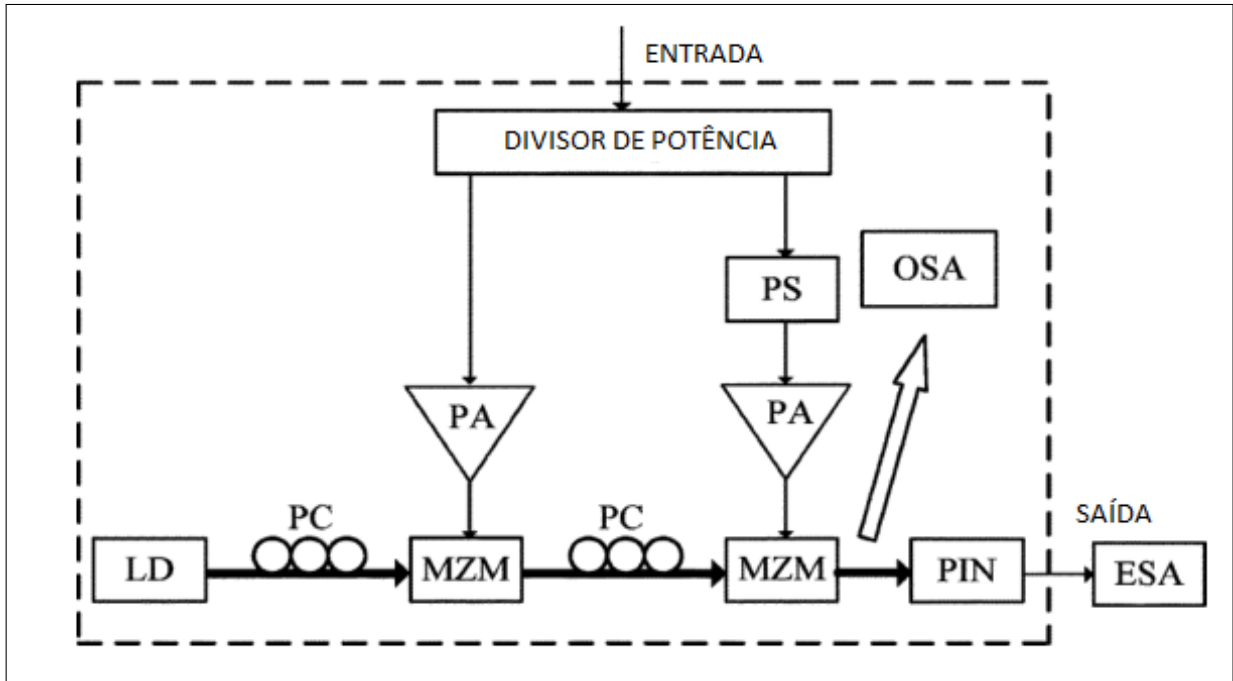
Fonte: (ZHOU *et al.*, 2013)

analisador de Espectro (ESA). Na análise dos resultados, as componentes quadruplicadas, geradas pelo batimento, apresentaram potências espectrais cerca de 15 dB maiores que as componentes restantes e para valores de frequências de sinal de 1 GHz até 10 GHz configurados na entrada, obteve-se saída de 4 a 40 GHz.

Em seu trabalho, (ZHANG *et al.*, 2007a) propõe uma sistema que multiplica a frequência portadora do sinal modulando de entrada em seis vezes, de forma cascadeada de MZMs tal qual o sistema anterior, porém no segundo estágio de modulação o modulador de intensidade é substituído por um modulador de fase, Figura 9.

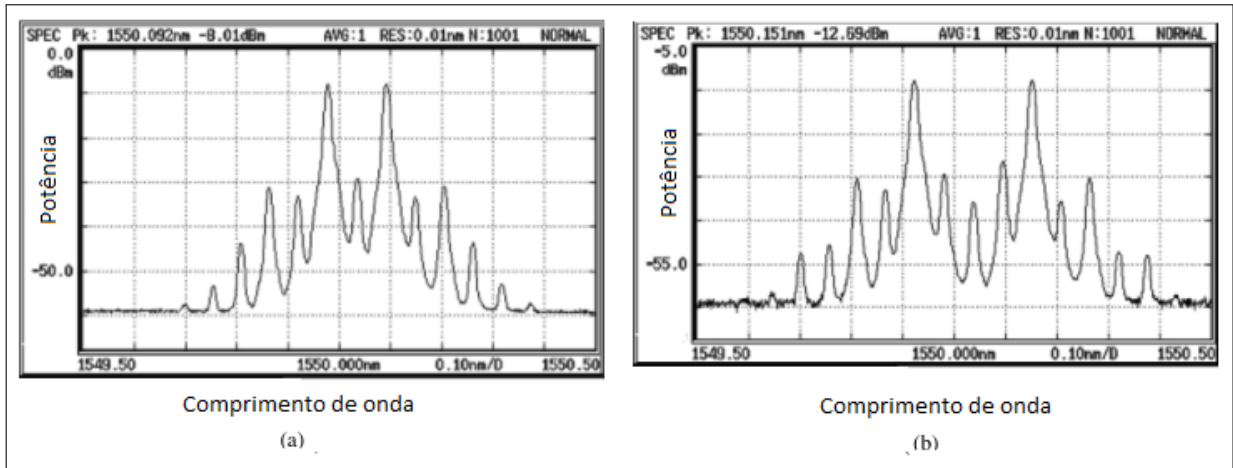
Novamente o sinal aplicado na entrada do sistema é modulado em intensidade conferindo na saída deste modulador de primeiro estágio a supressão das componentes pares e dois sinais de saída cujas portadoras são coerentes, então o deslocador de fase elétrico imprime uma fase de $\pi/2$ e novamente os sinais são injetados, nesse momento, no modulador de fase, então através do controle do índice de modulação deste, que está relacionado com a tensão do sinal modulado e a tensão de meia onda do modulador de fase, na Figura 10 vemos a geração de

Figura 7 – Sistema óptico para multiplicação de um sinal de micro-ondas a partir de dois moduladores *Mach-Zehnder* cascateados.



Fonte: (ZHANG *et al.*, 2007b)

Figura 8 – Espectro de frequência na saída do sistema de moduladores cascateados. a) Saída do primeiro modulador. b) Saída do segundo modulador.

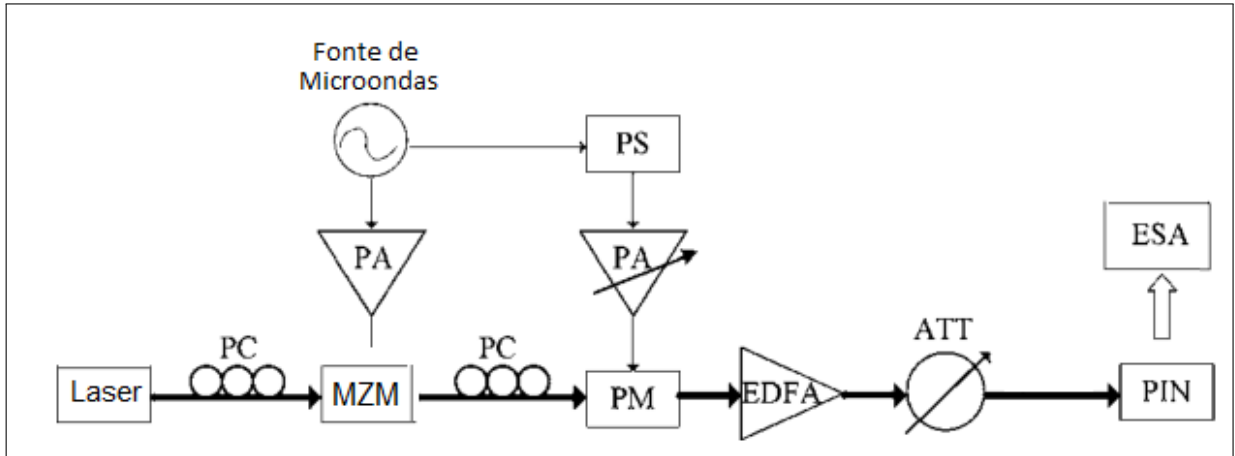


Fonte: (ZHANG *et al.*, 2007b)

bandas laterais que através de batimento sextuplicam a frequência de entrada do sistema. Com uma modulação de 6 GHz obtém-se um sinal a 36 GHz com potência espectral de -19 dBm e largura de banda em 20 MHz.

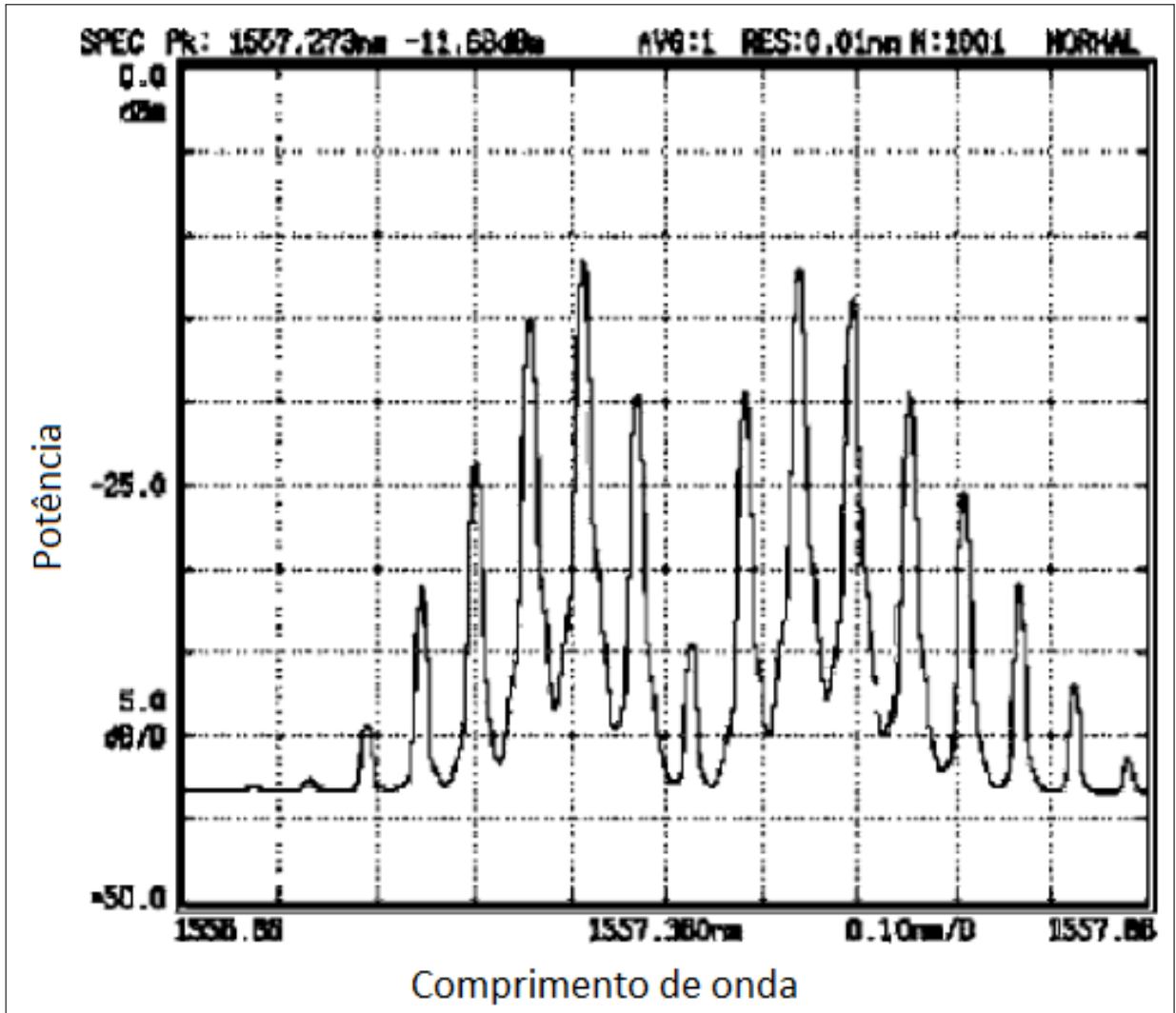
A crescente necessidade de utilização de bandas cada vez maiores conduziu (LI; YAO, 2010) a propor um sistema similar aos relacionados anteriormente que multiplica a frequência de um sinal de entrada por oito, Figura 11, tal configuração consiste em dois moduladores *Mach-Zehnder*, cascateados conectados por um deslocador óptico de fase tunável (TOPS), além

Figura 9 – Sistema multiplicador de frequências moduladas por seis.



Fonte: (ZHANG *et al.*, 2007a)

Figura 10 – Espectro de frequência na saída do sistema de multiplicador de frequência por seis.



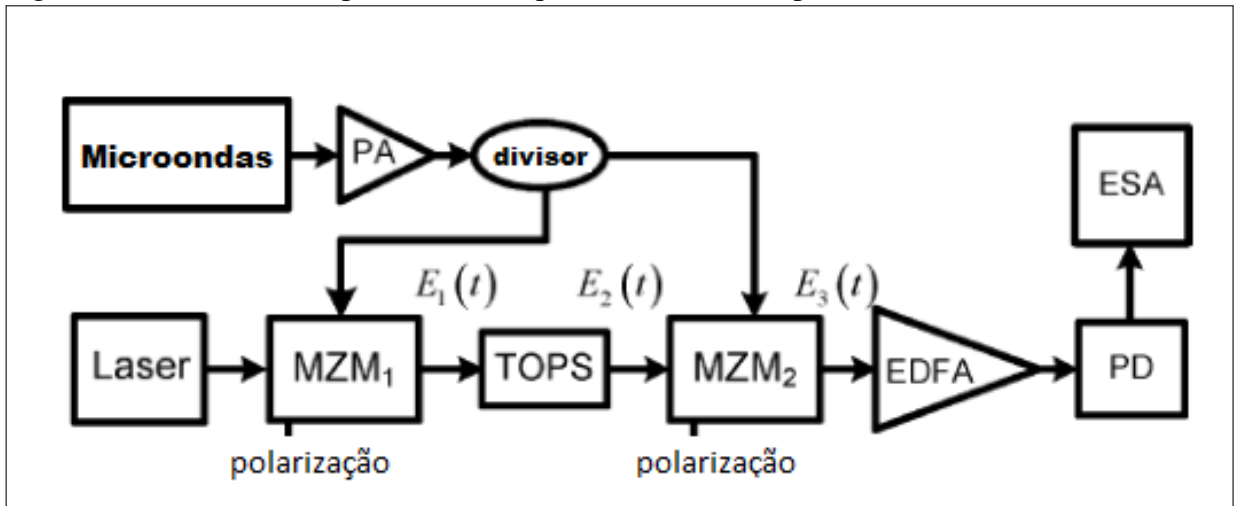
Fonte: (ZHANG *et al.*, 2007a)

de um amplificador de fibra de Érbio dopado (EDFA).

Para a obtenção das bandas laterais de quarta ordem é necessário que sejam obedeci-

das algumas condições, são elas: o índice de modulação dos MZMs devem coincidir, a diferença de fase inicial das fontes de micro-ondas deve ser nula e o deslocador de fase inserido entre os moduladores deve imprimir uma diferença de π entre os feixes de saída do primeiro modulador. A Figura 12 mostra as bandas laterais de quarta ordem, que através de batimento, multiplicam a frequência do sinal da fonte por um fator de oito.

Figura 11 – Sistema multiplicador de frequências moduladas por oito.



Fonte: (LI; YAO, 2010)

2.4.3 Técnica de geração de micro-ondas por loop óptico.

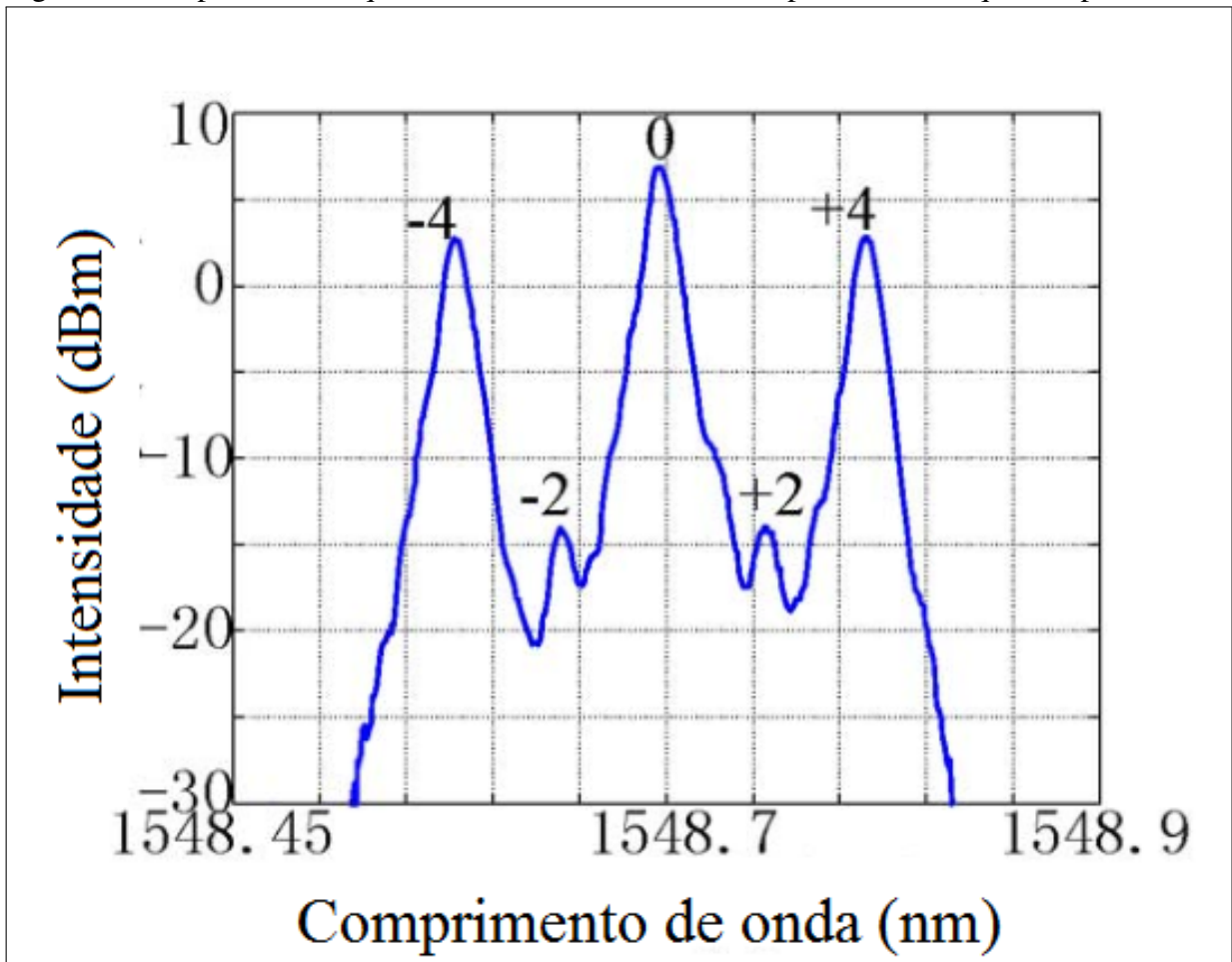
A geração de micro-ondas por meio da técnica de loop óptico é uma técnica que utiliza um circuito optoeletrônico para gerar sinais de micro-ondas. O circuito consiste em um laser de diodo sintonizável, um modulador eletro-óptico, um amplificador óptico e um circulador.

O processo começa quando o laser de diodo é sintonizado em uma frequência específica e é enviado para o modulador eletro-óptico. O modulador é então alimentado por um sinal de baixa frequência que modifica as características ópticas do feixe de laser gerado, resultando em uma portadora modulada.

A seguir, o sinal modulado é amplificado pelo amplificador óptico e, em seguida, passa pelo circulador, que direciona o sinal para o circuito de *feedback* do loop óptico. Nesse ponto, o sinal de micro-ondas é gerado pela oscilação de luz que ocorre no circuito optoeletrônico. (INSUA; SCHAFFER, 2007).

A maneira mais utilizada para geração de micro-ondas, é discutida na subseção 2.4.2, esse método requer que a largura de banda do modulador de intensidade (*Mach-Zehnder*), seja

Figura 12 – Espectro de frequência na saída do sistema multiplicador de frequência por oito.



Fonte: (LI; YAO, 2010)

maior que a frequência em micro-ondas desejada (HEDEKVIST *et al.*, 2004), exatamente para que a multiplicação através de batimento de ondas seja atingida.

Sistemas baseados laço de fibra óptica (*loop*) são capazes de gerar sinais DSB-SC (banda dupla com portadora suprimida). São esquemas de fácil implementação e apresentam a vantagem da filtragem dos harmônicos ser feita dentro do próprio *loop*, através da mudança de fase das ondas de batimento, relacionadas com o comprimento do laço, oferecendo também alta eficiência na geração dos harmônicos.

Como dito anteriormente, laço óptico consiste basicamente de um acoplador óptico e conectado em uma fibra óptica em *loop*, onde o sinal de entrada é dividido em duas partes propagantes em sentidos opostos. Para a geração do sinal DSB-SC, coloca-se um modulador de fase dentro do laço em uma localização $\Delta\lambda$, em relação ao eixo de simetria do *loop* (INSUA; SCHAFFER, 2007), esse ponto é determinado de acordo com a necessidade de quais harmônicos serão filtrados. Por exemplo, para a filtragem das componentes ímpares deve-se fixar $\omega_m \tau = \frac{\pi}{2}$,

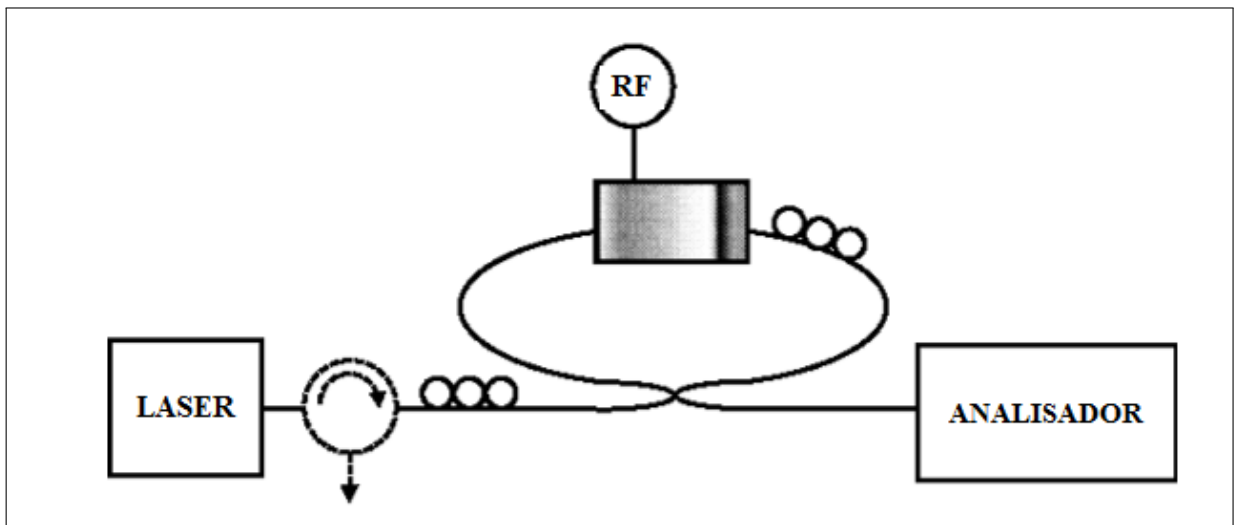
onde $\omega_m \tau$ é a frequência da fonte de luz e τ é o atraso de propagação de onda no laço:

$$\tau = n \cdot \frac{\Delta \lambda}{2c}, \quad (2.17)$$

onde n é o índice de refração no núcleo da fibra e c a velocidade da luz.

Métodos de geração de frequências na faixa de micro-ondas também são praticados com o uso de moduladores de fase, nesses usa-se moduladores de $LiNbO_3$ que produzem componentes harmônicas de quarta ordem, Figura 13, e atingem, através de procedimentos experimentais resultados de 40 GHz de frequência gerada. Tal qual os demais métodos citados nas seções anteriores, o método a partir de modulação de fase utiliza como fonte de luz um laser e diferente de modulação em intensidade, que utiliza o efeito de eletro-absorção, o método de modulação de fase, é feito através de polarização da onda num divisor de feixe (*acoplador óptico*) ou com o uso de um componente polarizador.

Figura 13 – Sistema óptico para geração de harmônicos de micro-ondas a partir modulação de fase.



Fonte: (HEDEKVIST *et al.*, 2004)

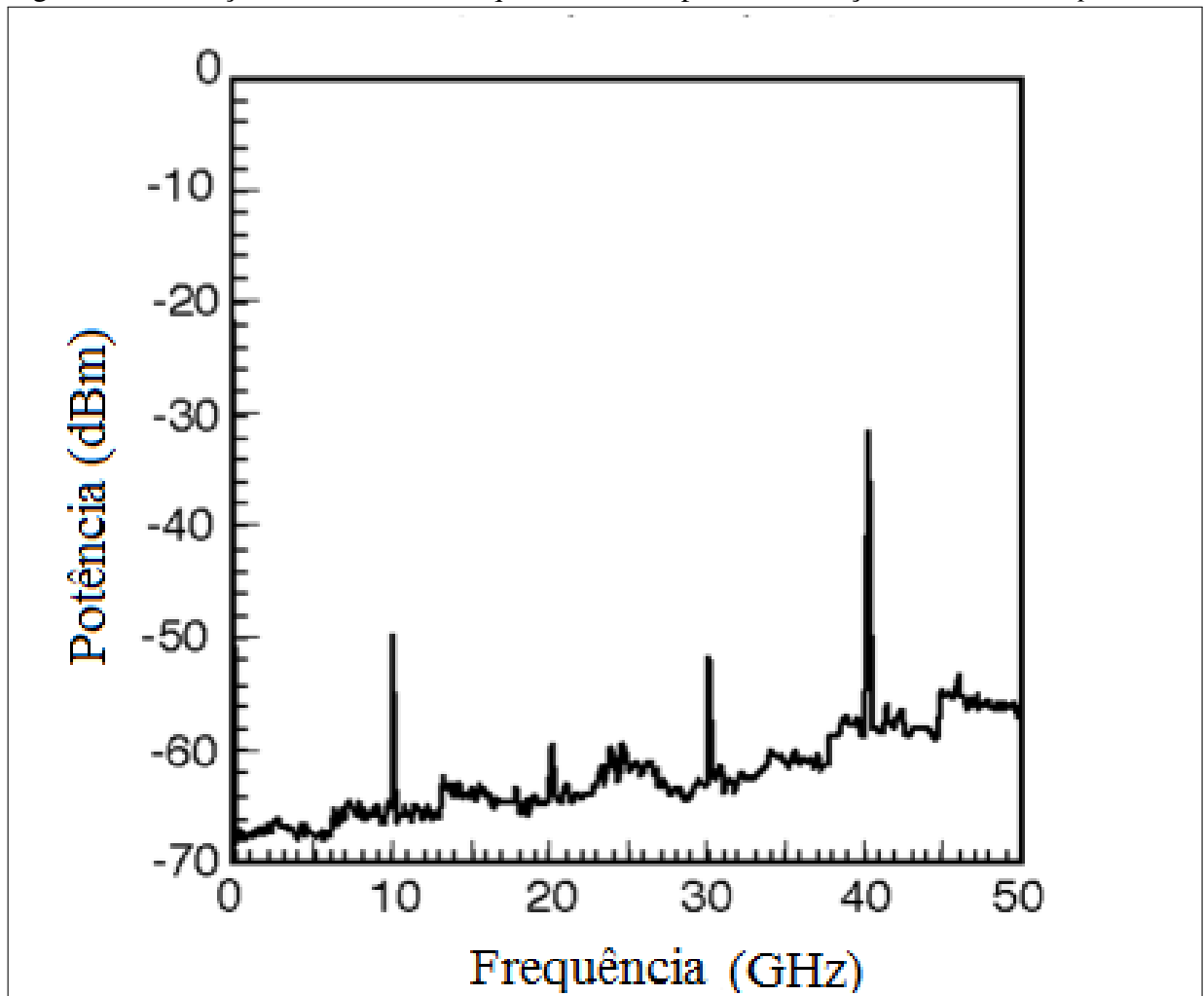
O objetivo principal é fazer a conversão de modulação em fase para modulação em amplitude, para tanto utiliza-se um polarizador ou um espelho óptico em *loop*, as equações 2.18 e 2.19 definem a relação entre a fase e o sinal modulado V_{RF} , onde V_{DC} e V_{π} são a tensão de polarização do modulador e o sinal necessário para que haja uma diferença de fase de 180 graus visto na subseção 2.4.2, respectivamente (HEDEKVIST *et al.*, 2004)

$$\varphi(t) = \pi \frac{V_{DC} + V_{RF}}{V_{\pi}}. \quad (2.18)$$

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{2} \left(1 + \cos\left(\frac{\pi(V_{DC} + A\cos(2\pi f_{RF}t))}{V_{\pi}}\right) \right). \quad (2.19)$$

O termo referente ao cosseno de um cosseno na equação 2.19 é responsável pelas componentes harmônicas, que podem ser percebidas numa decomposição em séries de Bessel. Em um dos experimentos o modulador de fase conectado em um *loop* óptico, configurando o esquema de *loop* visto na Figura 13. O gráfico da Figura 14 exibe a eficiência do sistema na geração da quarta harmônica do sinal modulado.

Figura 14 – Geração da harmônica de quarta ordem a partir modulação de fase em *loop*.

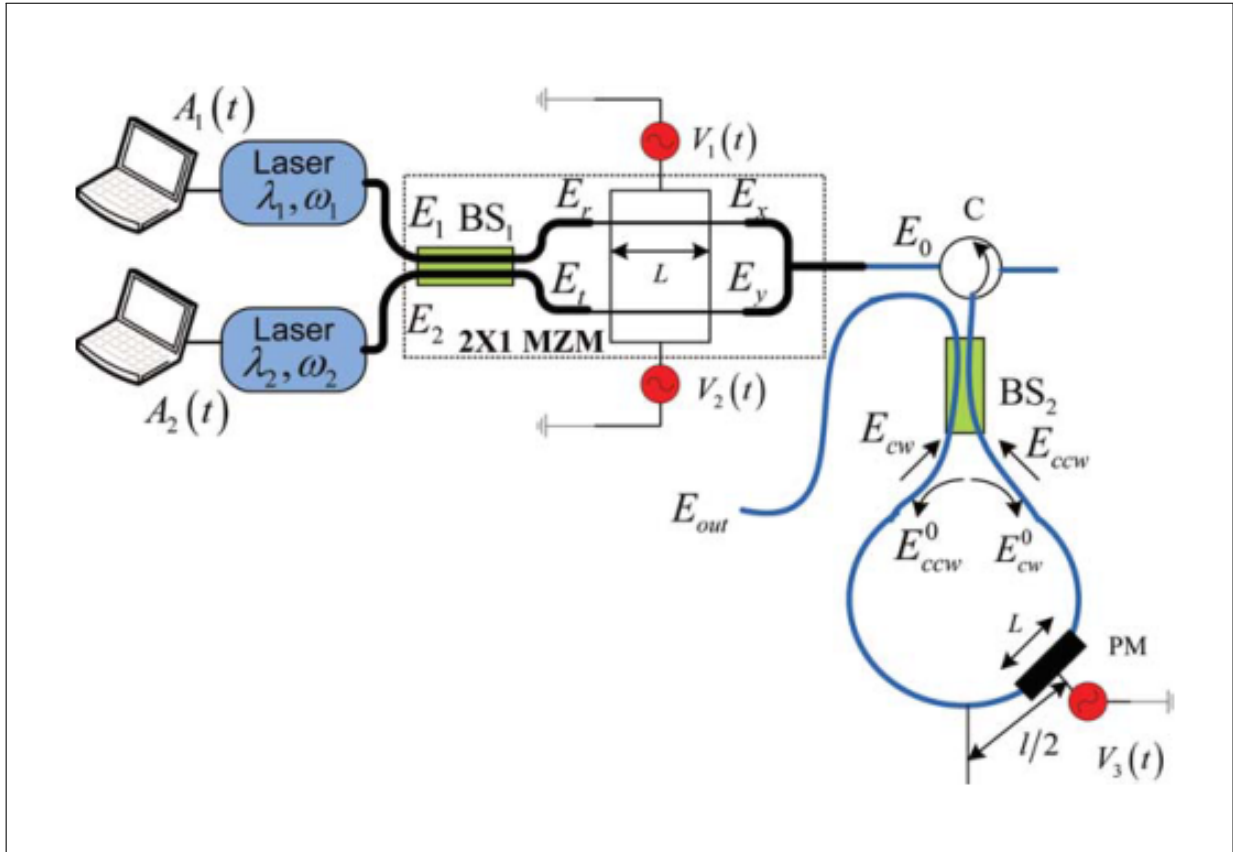


Fonte: (HEDEKVIST *et al.*, 2004)

Também utiliza-se modulação de intensidade juntamente com com um laço óptico e um modulador de fase para a geração de uma particularidade de harmônicos, separação de harmônicos pares. (OLIVEIRA *et al.*, 2011), propõe em seu trabalho uma configuração que combina um MZM e um laço de fibra óptica *Sagnac*, Figura 15, para produzir experimentalmente

essa propriedade de separação. Utiliza-se duas fontes externas moduladas com frequências diferentes.

Figura 15 – Sistema geração da harmônicos pares.



Fonte: (OLIVEIRA *et al.*, 2011)

Se os sinais modulantes dos lasers forem contínuos, apenas as componentes harmônicas pares serão geradas, por outro lado se estes sinais não forem contínuos no tempo, o espectro do produto delas será dado pelas frequências $\omega_1 - \omega_2 \pm n\Omega$, sendo Ω a frequência do sinal RF, a equação 2.20 descreve esse comportamento, onde $A_1(t)$ e A_2 são os sinais modulantes dos lasers, $V(t)$ é o sinal de tensão modulante a ser inserido no modulador e V_π a tensão requerida para mudança de fase da onda em π .

$$|E_{out}|^2 = -2A_1(t)A_2(t)J_0\left(\frac{\pi}{V_\pi}\right)J_1^2\left(\frac{\pi\Delta V(t)\sin(1,5\Omega\tau)}{V_\pi}\right)\cos[(\omega_1 - \omega_2)t] \sin(6\Omega t) + 2A_1(t)A_2(t)J_1^2\left(\frac{\pi\Delta V(t)\sin(1,5\Omega\tau)}{V_\pi}\right)J_2\left(\frac{\pi}{V_\pi}\right) \cos[(\omega_1 - \omega_2)t] \{\sin(2\Omega t) - \cos(8\Omega t) + \cos(4\Omega t)\}. \quad (2.20)$$

O modulador de intensidade definirá em sua saída bandas laterais do sinal modulado, e o laço, através de configuração do índice de modulação de fase do modulador de fase inserido neste, definirá a saída somente das harmônicas pares do sinal. Tal sistema opera com dois lasers,

portanto é passível ocorrência de ruído de fase associado a geração de componentes harmônicas, fato esse que dificulta sua utilização em sistemas de transmissão de sinais digitais modulados em fase (OLIVEIRA *et al.*, 2011).

3 SISTEMAS DE GERAÇÃO DE HARMÔNICOS: SISTEMAS E METODOLOGIA

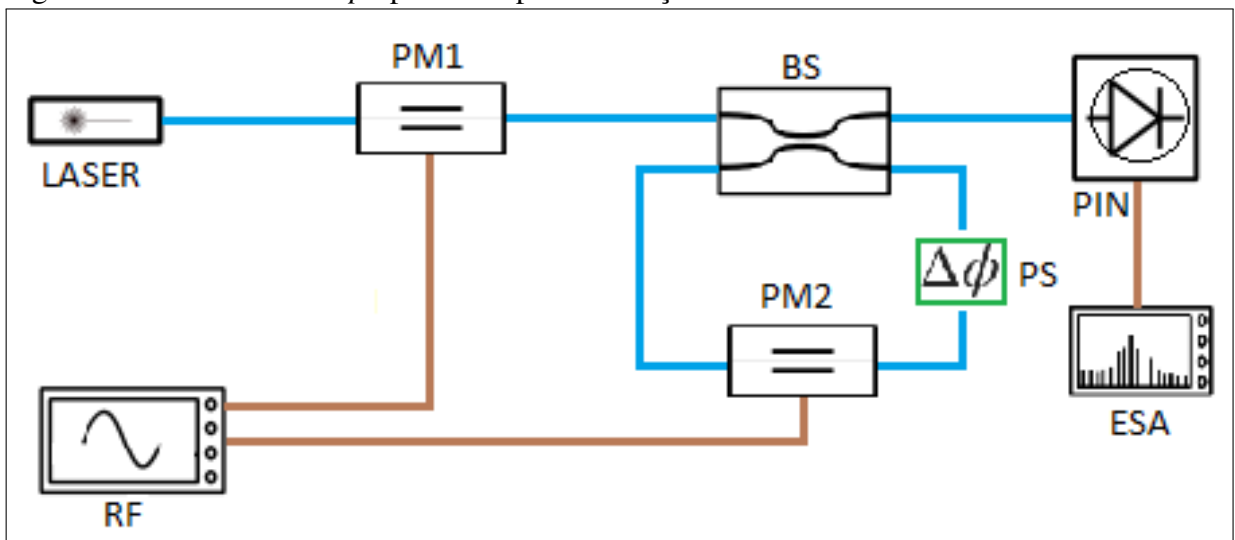
3.1 Introdução.

Nesse capítulo são apresentados três sistemas geração de frequências harmônicas a partir do sinal senoidal modulante para as frequências fundamentais de 1 e 10 GHz. O primeiro sistema é uma configuração de laços de fibra óptica em paralelo, conectados entre si através de dois divisores de feixe e com modulação de fase em um dos laços. O segundo sistema é composto de três moduladores de fase dispostos em três laços de fibra óptica e modulados pelo mesmo sinal RF. Finalmente, o terceiro sistema, conta com dois moduladores de fase, sendo um no interior do laço e outro externo ao laço. Todos os sistemas propostos são comparados entre si e com o sistema detalhado em (HEDEKVIST et al., 2004).

3.2 Sistema 1: *Loop* óptico e dupla modulação de fase.

O sistema óptico proposto é baseado em fibra óptica conforme mostrado na Figura 16, onde a configuração óptica consiste em um laser continuous wave (CW) operando em 1550 nm e 0 e 3 dBm de potência, dois moduladores de fase (PM1 e PM2), um acoplador óptico (BS) balanceado (50/50) e um fotodiodo PIN de responsividade 1 A/W. Foi usado um gerador de onda senoidal para multiplicação dos sinais RF para modulação da portadora óptica e uma analisador espectral na saída do PD.

Figura 16 – Sistema 1: *loop* óptico e dupla modulação de fase.

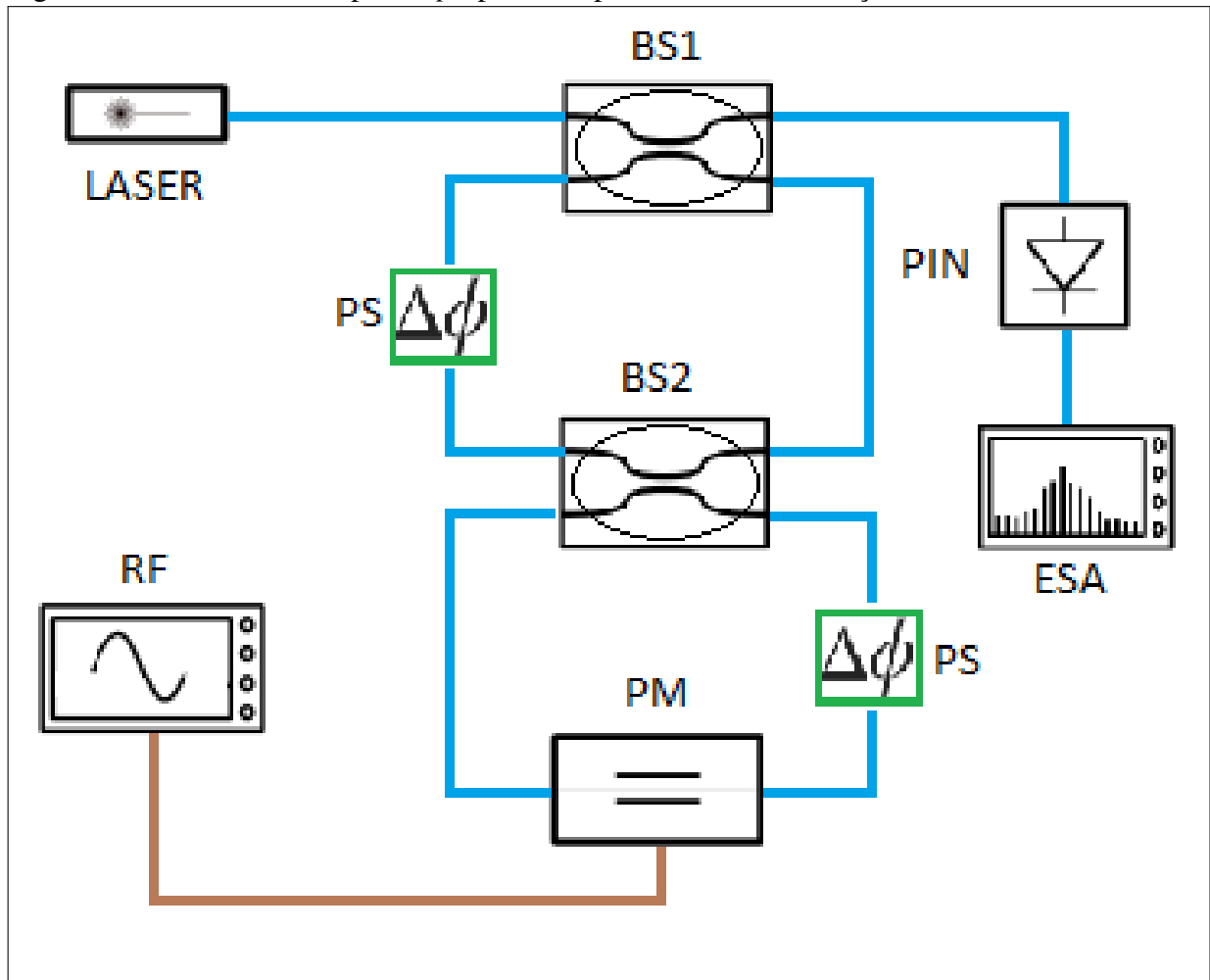


Fonte: O autor.

No sistema, a portadora CW emitida pelo laser é primeiramente modulada em fase externamente pelo sinal RF ao passar pelo PM1. Em seguida, parte desse sinal é novamente modulado no PM2 ao passar pelo laço óptico formado pelo acoplador (BS). Dessa forma, o sinal óptico que circula no laço óptico é duplamente modulado em fase e sofre interferência com o sinal óptico modulado em PM1. A intenção foi produzir através de laço óptico a mistura de sinais realimentados e observar seu comportamento na variação de potência quando inclui-se deslocadores de fase no laço.

3.3 Sistema 2: Duplo *loop* óptico em paralelo com modulação de fase.

Figura 17 – Sistema 2 - Duplo *loop* óptico em paralelo com modulação de fase.



Fonte: O autor.

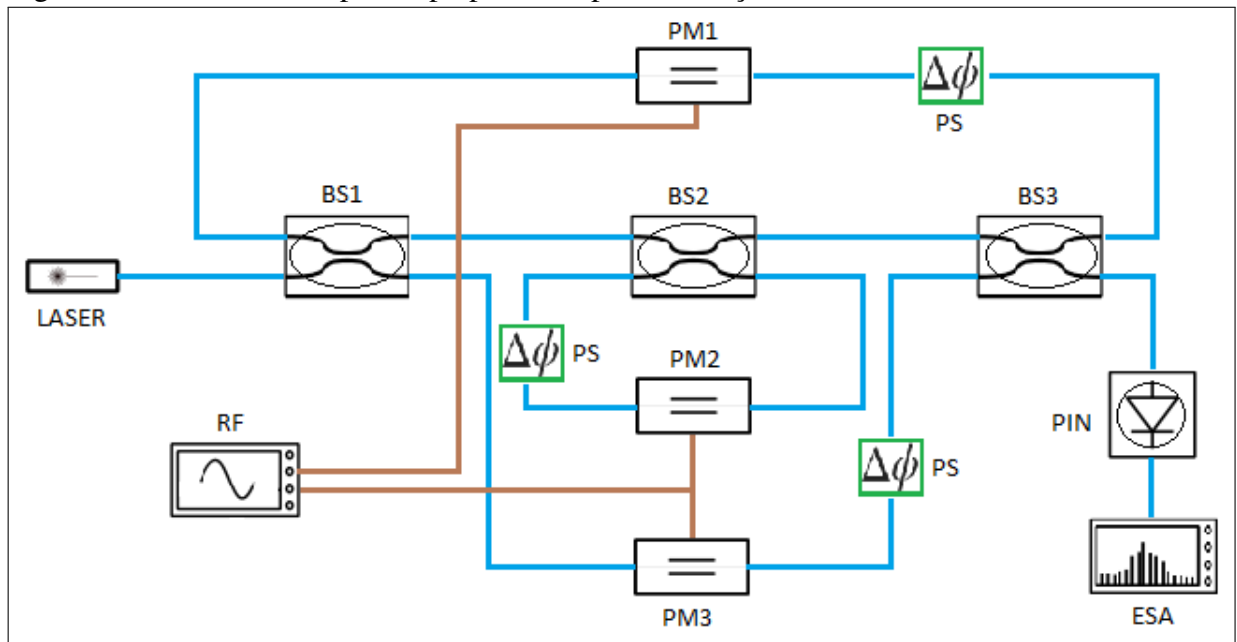
O aparato óptico mostrado na Figura 17 é composto de dois acopladores balanceados, BS1 e BS2, um laser para geração da portadora óptica e um fotodetector PIN. Duas das quatro portas de cada beam splitter (BS) são conectadas entre si para formar um *loop* e as duas outras

portas do BS2 são conectadas entre si por meio de um modulador de fase (PM) para constituir o segundo *loop*. As demais portas do BS1 são conectadas, respectivamente, ao laser e ao fotodetector, conforme pode ser visto na Figura 17, cada *loop* apresenta o mesmo tamanho e deslocadores de fase ópticos, PS, são colocados para simular ajuste no comprimento destes. Para modulação da portadora óptica gerada pelo laser no segundo *loop*, foi usado o simulador de gerador de sinais de RF senoidal na entrada de PM. E um simulador de analisador de espectro elétrico (ESA) é empregado para analisar os sinais harmônicos produzidos pelo aparato óptico (??).

3.4 Sistema 3: Triplo *loop* óptico e tripla modulação de fase.

O segundo aparato óptico, mostrado na Figura18 é composto de três divisores de feixe também balanceados, BS1, BS2 e BS3, um Laser para a geração da portadora ótica e um fotodetector, três portas dos BSs são conectadas entre si formando um sistema cascadeado de divisores de feixe, as portas restantes são ligadas ao Laser, no BS1, e as saídas dos acopladores restantes, BS2 e BS3 são conectadas aos moduladores de fase e ao PIN, este último converte os sinais óticos em elétricos e são analisados pelos analisador de espectro virtual.

Figura 18 – Sistema 3: triplo *loop* óptico e tripla modulação de fase.



Fonte: O autor.

Na primeira entrada do acoplador BS1 há injeção do sinal do laser, porém este, modulado pelo mesmo sinal fornecido pelo gerador de RF onde é distribuído simultaneamente a

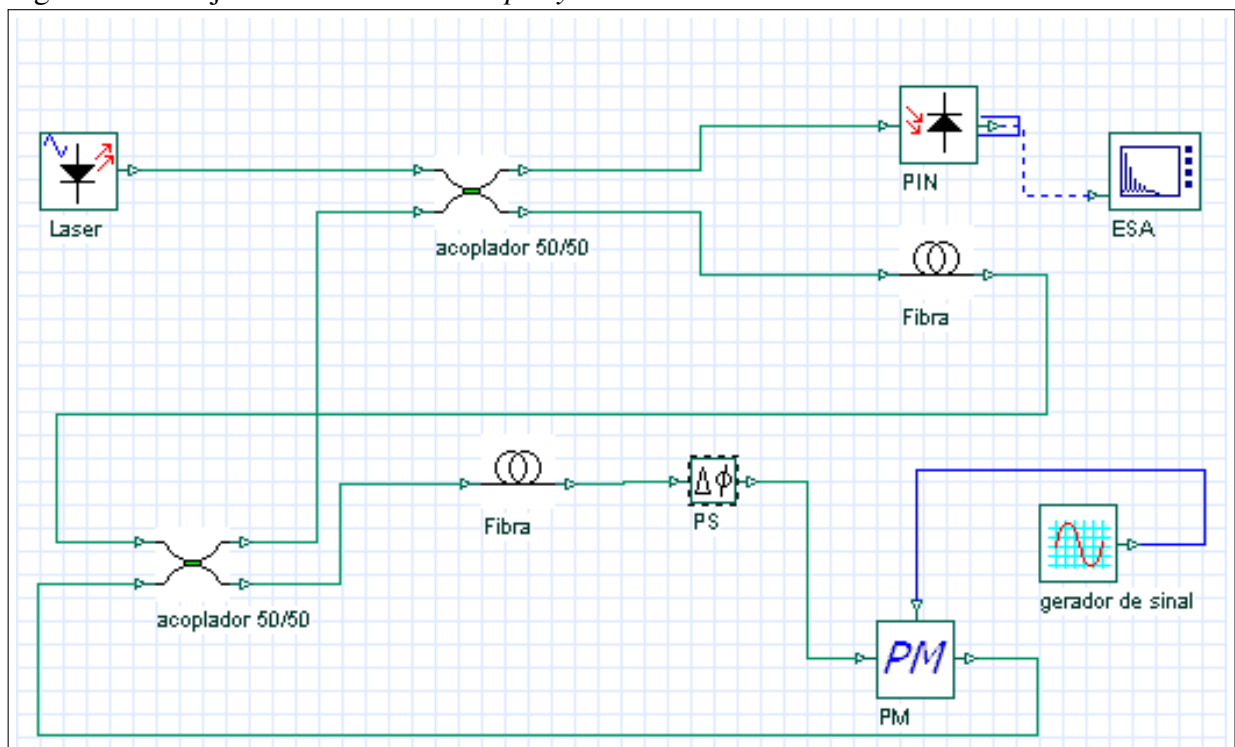
cada modulador de fase posicionado nos laços formados de fibra óptica, a Figura 18, mostra como os laços são construídos e como estão dispostos os moduladores de fase. Os *loops* tem o mesmo tamanho e deslocadores de fase ópticos são colocados mais uma vez nos laços.

3.5 Metodologia.

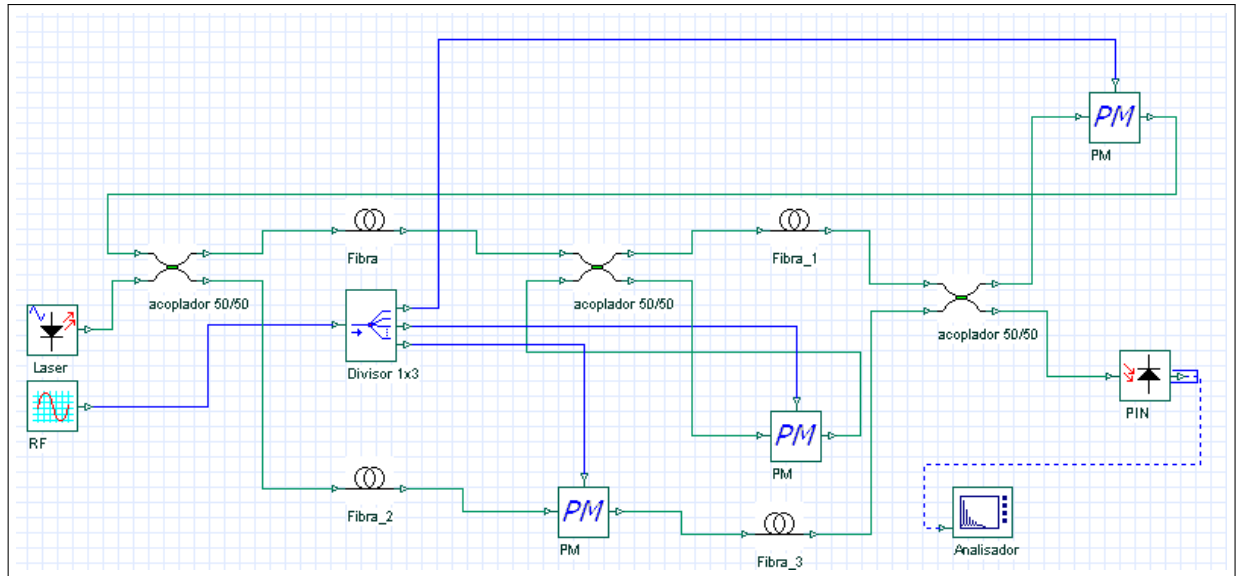
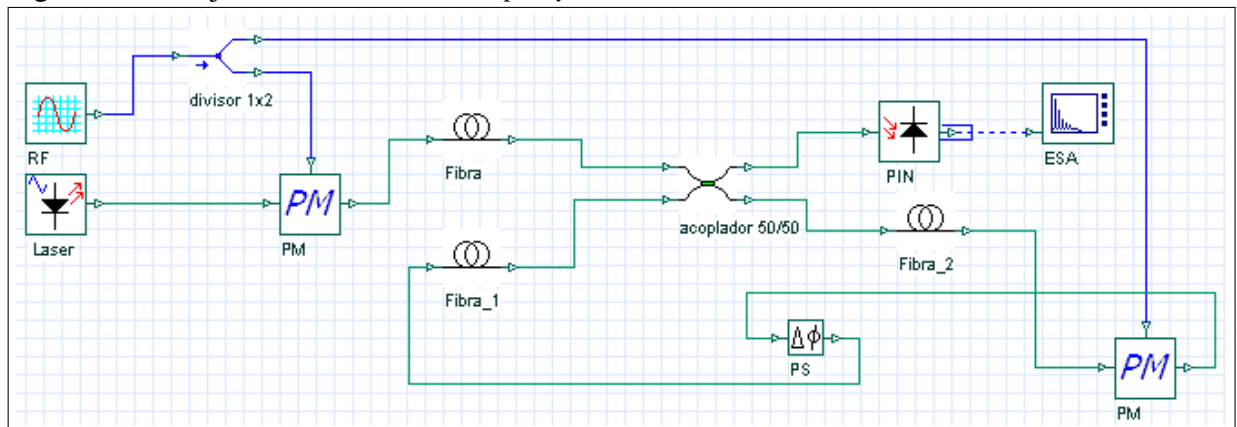
Os três sistemas foram simulados computacionalmente através do software *OptiSystem*®, que entre outras aplicações permite emulação de sistemas de telecomunicações e dispositivos ópticos através de sua biblioteca. Trata-se um software de ambiente amigável e possui uma biblioteca com mais de 400 dispositivos ópticos.

Durante o experimento foram configurados os parâmetros de potência de injeção do laser e frequência modulada, a Tabela 1 mostra as configurações dos componentes ópticos. Para os três os sistemas, ajustou-se as frequências de 1 GHz e 10 GHz e potência do Laser em 0 e 3 dBm, os projetos podem ser vistos nas Figuras 19, 20 e 21. Para a interpretação dos resultados foi necessário a configuração da resolução das telas do analisador virtual. Além disso foram configuradas as penalidades referentes a inclusão de divisores (3 dB) de sinal, perda de inserção dos divisores de feixe (3 dB), atenuação na fibra (0,2 dB/km). A Tabela 2, mostra a configuração feita nos parâmetros do *software* para captura dos dados no *MATLAB*®.

Figura 19 – Projeto do Sistema 1 no *OptiSystem*®.



Fonte: *OptiSystem*®

Figura 20 – Projeto do Sistema 2 no *OptiSystem*®.Fonte: *OptiSystem*®.Figura 21 – Projeto do Sistema 3 no *OptiSystem*®.Fonte: *OptiSystem*®.

O comprimento de seqüências de bits, juntamente com outro parâmetro de configurações da simulação chamado de número de amostras por bits, geram um total de 65536 amostras por laço de interação.

Tabela 1 – Configuração básica dos sistemas ópticos.

Laser	Gerador RF	PIN	Fibra óptica	Acoplador
0 e 3 dBm	Fase	1A/W	0,2 cm	50/50
1550 nm	1 e 10 GHz	-	16.5 ps/nm/Km	-
BW: 10 MHz	-	-	DGD:0.2 ps/Km	-
-	-	-	-	-

Fonte: o autor.

O segundo momento da análise dos resultados, foi o processamento dos dados

colhidos, desse modo, entre as várias interações da simulação, foram escolhidos aleatoriamente 150 capturas de tela, correspondentes a momentos da simulação associados as frequências e suas respectivas potências espectrais. Todos os 65536 dados amostrados em 150 interações do laço, foram processados no software *MATLAB*®.

Tabela 2 – Configuração usada no *OptiSystem*©

Sequência	Bits	Amostras	Interações
256	256	65536	150

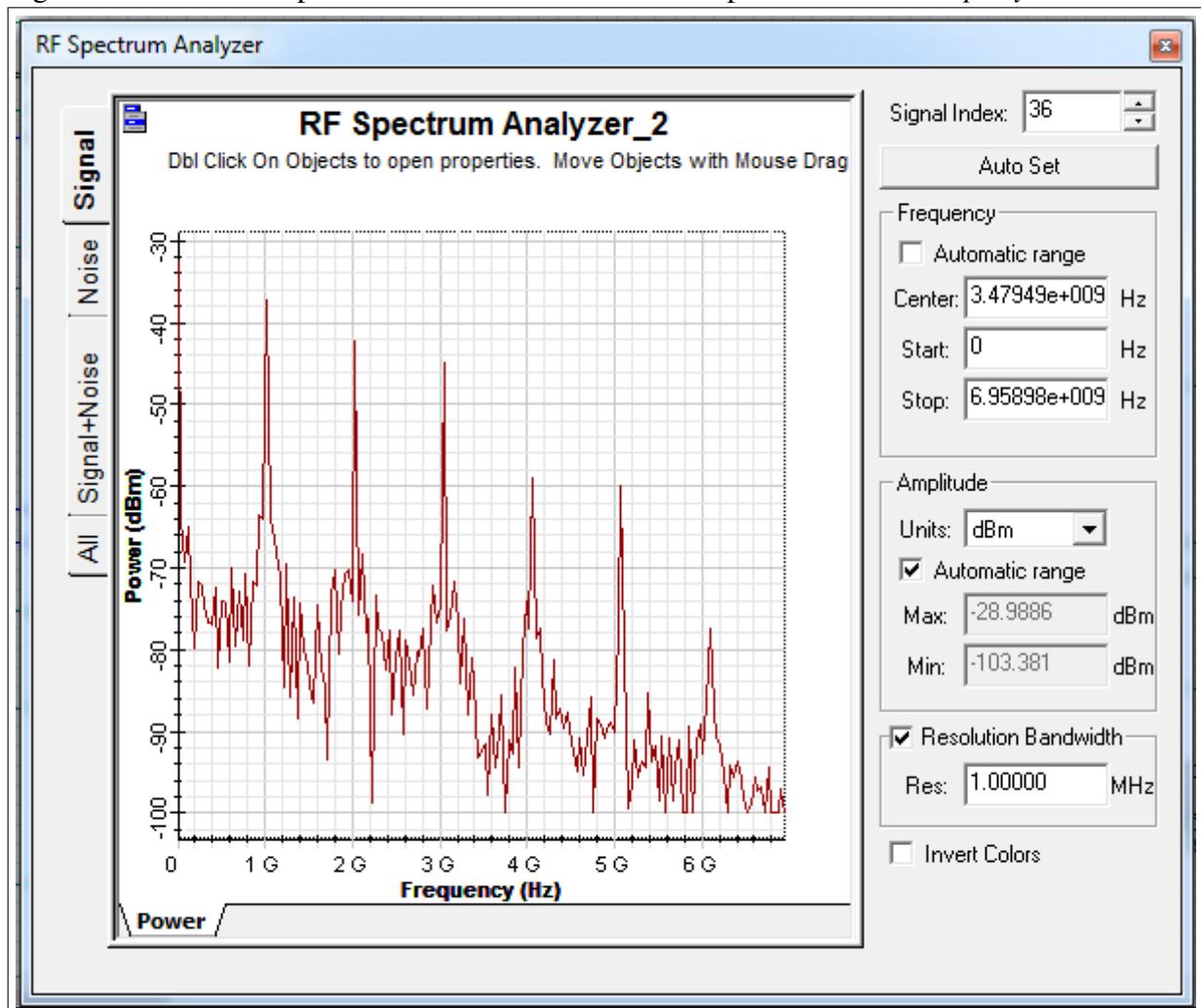
Fonte: o autor.

Nesse tratamento de dados gerou-se uma média de potências dos dados colhidos, emulando o tratamento de dados feito por um analisador de espectros real, que captura dados instantâneos e realiza médias destes, para fornecer na sua tela um comportamento estático, para fim de melhor visualização do comportamento dos sistemas ou dispositivo analisado. Todo esse processo foi realizado para a obtenção de gráficos para posterior análise de resultados. Um modelo matemático aproximado que descreve o campo elétrico da forma de onda na saída do fotodiodo PIN para os três sistemas propostos é dado por:

$$E_{out} \approx \eta \cdot \cos[\omega_c \cdot t + \sin(\omega_m \cdot t)] \cdot \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2^n}} \cdot \sum_{k=-\infty}^{+\infty} J_k(n) \cdot \cos[(\omega_c + k \cdot \omega_m) \cdot t] \right\}, \quad (3.1)$$

onde η é uma constante de proporcionalidade que depende da amplitude do campo elétrico da portadora óptica CW emitida pelo laser e do tipo de sistema óptico, ω_c e ω_m são as frequências angulares da portadora CW e do sinal RF, respectivamente. Assim, o sinal elétrico na saída do PD é $I(t) \approx \mathfrak{R} \cdot |E_{out}|^2$, sendo \mathfrak{R} a responsividade do PD. Para simulação numérica do sistema mostrado na Figura 18, foi usado a ferramenta computacional *OptiSystem*®.

Para a coleta de dados foram realizadas sucessivas simulações, correspondentes inúmeros laços de interações de simulação do software. Cada laço corresponde a um instante capturado na tela do analisador de espectro virtual do *OptiSystem*®, Figura 22.

Figura 22 – Instante capturado na tela do analisador de espectro virtual do *OptiSystem*®.Fonte: *OptiSystem*®.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

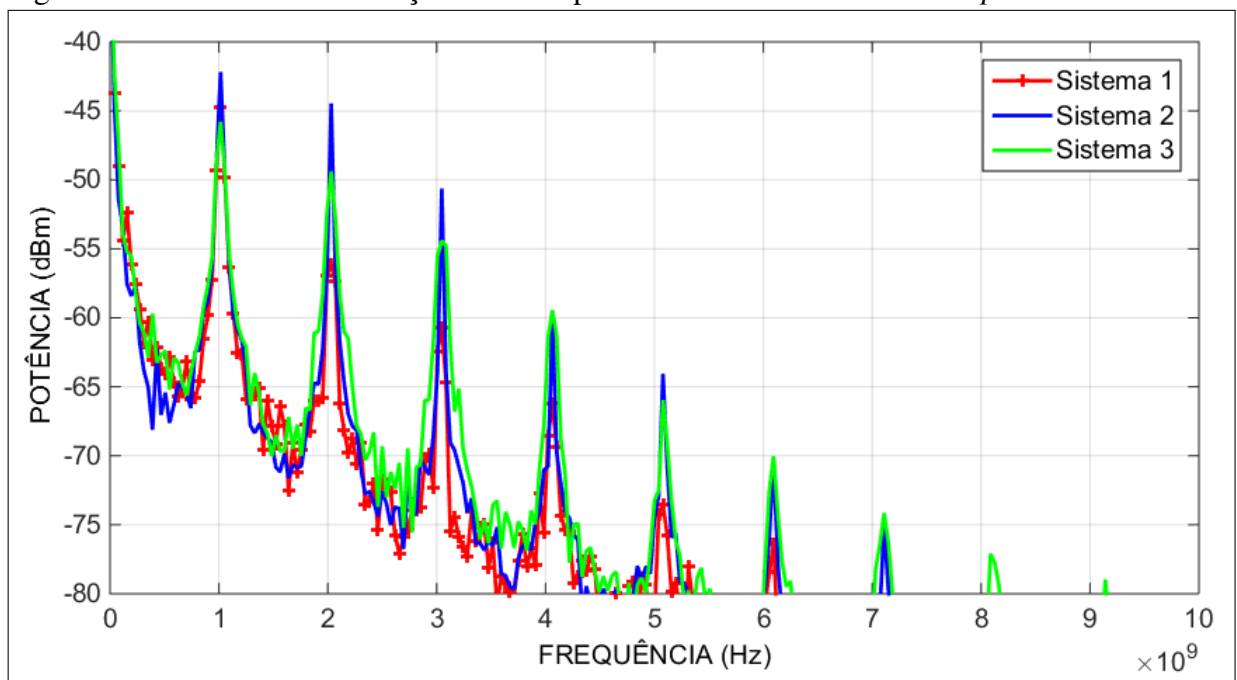
4.1 Introdução

Nessa seção são apresentados resultados através de gráficos e tabelas de potências espectrais além de discussões sobre os harmônicos gerados pelos sistemas propostos e um comparativo entre os sistemas propostos e um sistema referenciado na bibliografia . Os gráficos foram traçados exibindo o espectro do sinal gerador e os 5 primeiros harmônicos gerados em cada sistema proposto conferindo a quadruplicação de frequência.

4.2 Análise comparativa dos sistemas

As Figuras 23 e 24 demonstram o comportamento dos três sistemas modulados por um sinal de frequência em 1 GHz e nos gráficos das Figuras 25 e 26, frequência do sinal em 10 GHz, nesses gráficos vemos as potências de todos os harmônicos dos sistemas 1, 2 e 3, com a potência óptica do laser fixada em 0 dBm e 3 dBm , a mudança de potência no laser influencia diretamente os valores de potência espectral dos harmônicos gerados, fato que pode ser constatado através valores de potencias espectrais nas Tabelas: 3, 4, 5, 6 ,7 e 8 de potência óptica do laser em 0 e 3 dBm. Nas Tabelas 3 e 4 que descrevem o Sistema 1 por exemplo, o

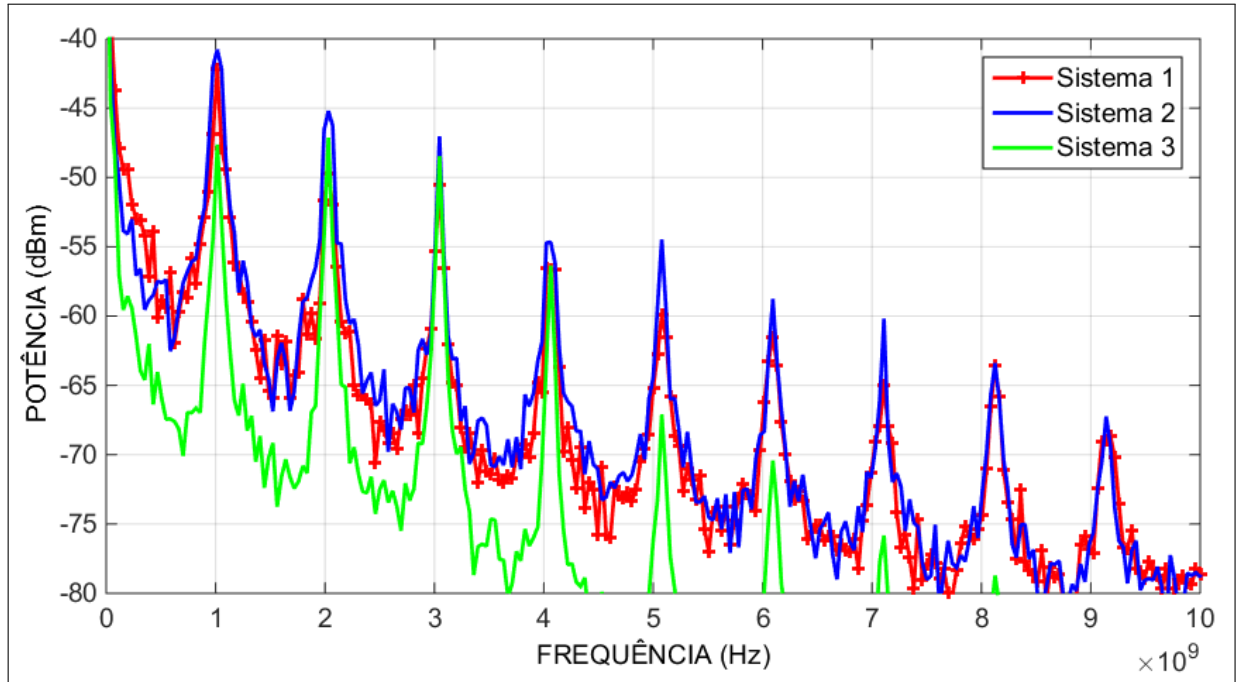
Figura 23 – Sistemas - Modulação 1 GHz e potência 0 dBm sem fase no *loop*.



Fonte: O autor.

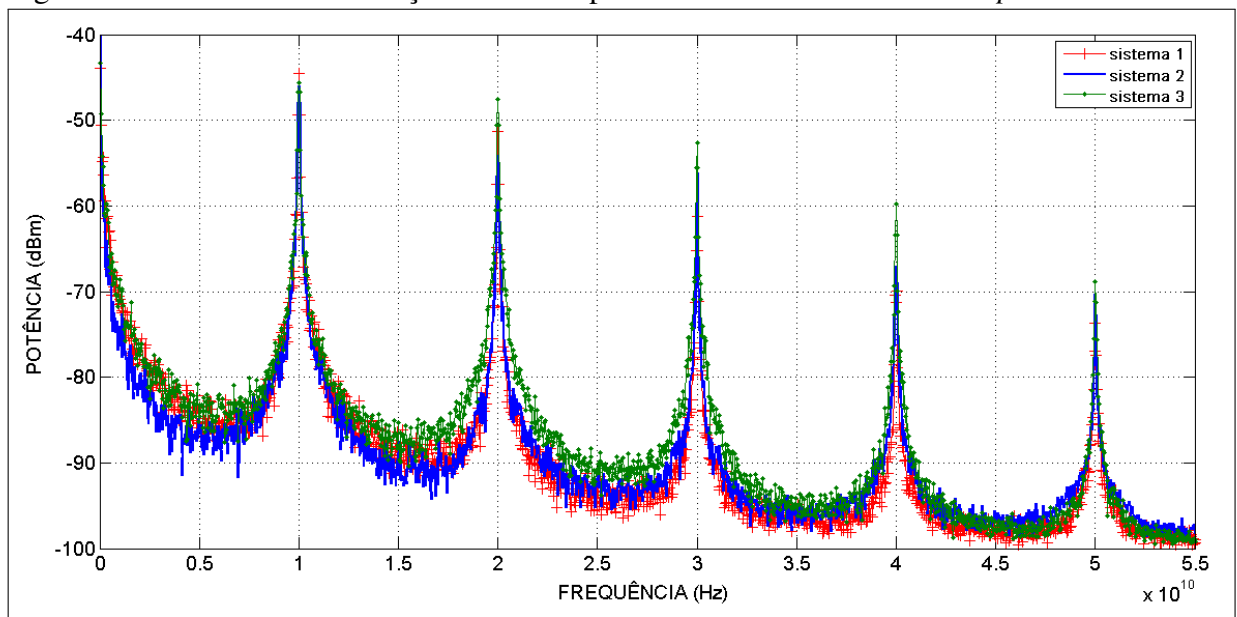
acréscimo sucessivo de fase de 90 graus nos laços através de um deslocador de fase diminui gradativamente a intensidade da potência espectral do primeiro ao quinto harmônico, fato que repete-se com aplicação da mesma condição nos laços dos demais sistemas.

Figura 24 – Sistemas - Modulação 1 GHz e potência 3 dBm sem fase no *loop*.



Fonte: O autor.

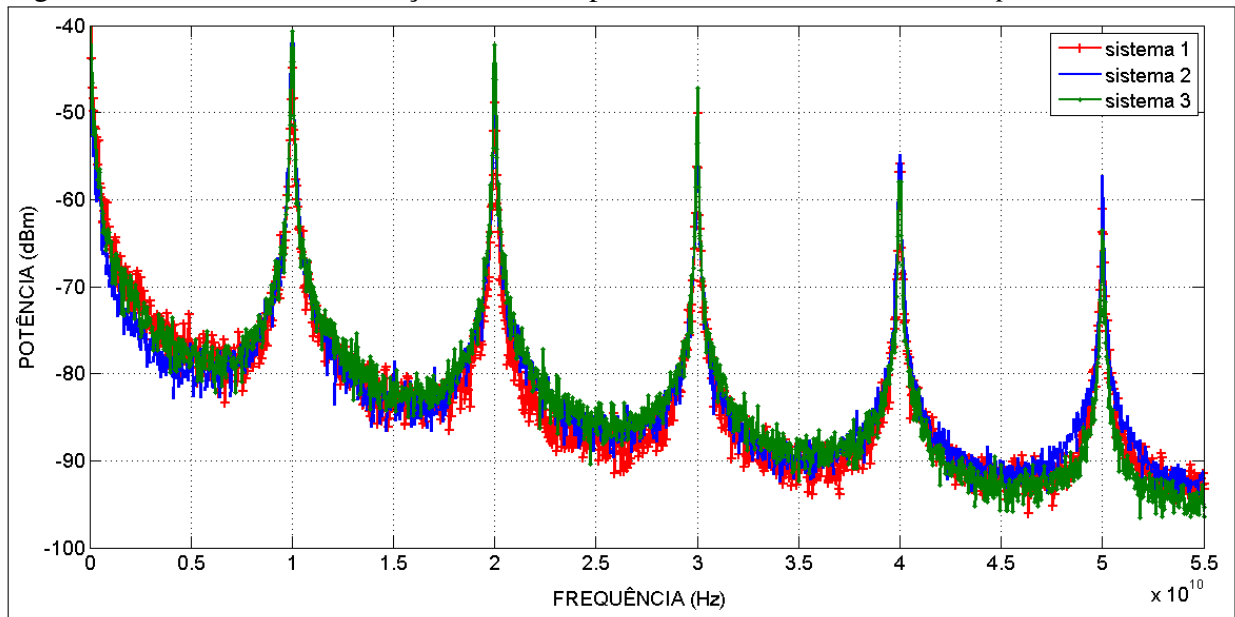
Figura 25 – Sistemas - Modulação 10 GHz e potência 0 dBm sem fase no *loop*.



Fonte: O autor.

A adição de fase simula a variação de comprimento da fibra, as Tabelas 3, 4, 5, 6, 7 e

Figura 26 – Sistemas - Modulação 10 GHz e potência 3 dBm sem fase no *loop*.



Fonte: O autor.

Tabela 3 – Potências dos harmônicos do Sistema 1 - (dBm) - Modulação 10 GHz e potência no Laser em 0 dBm.

Harmônicas	sem fase	fase 90	fase 180
1 ^o	-51,27	-58,25	-56,56
2 ^o	-61,20	-64,79	-66,91
3 ^o	-69,98	-72,19	-71,53
4 ^o	-73,64	-73,34	-74,33
5 ^o	-75,52	-75,70	-76,53

Fonte: o autor.

Tabela 4 – Potências dos harmônicos do Sistema 1 - (dBm) - Modulação 10 GHz e potência no Laser em 3 dBm.

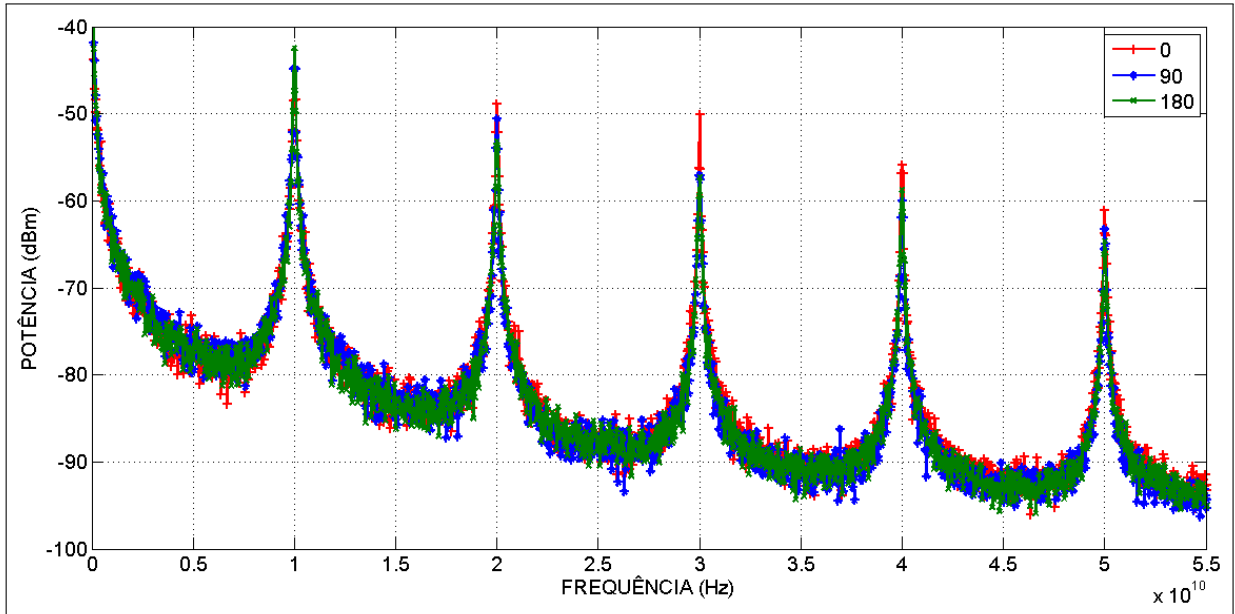
Harmônicas	sem fase	fase 90	fase 180
1 ^o	-48,84	-50,59	-53,17
2 ^o	-50,11	-57,07	-57,31
3 ^o	-55,88	-57,98	-58,74
4 ^o	-60,15	-63,28	-63,28
5 ^o	-63,52	-65,00	-66,66

Fonte: o autor.

8 de potência óptica do laser em 0 e 3 dBm. A Tabela 4 também expõem que a mudança fase, para todos os sistemas de geração de micro-ondas aqui apresentados, implicam em um decréscimo dos valores de potência das componentes harmônicas geradas, que pode ser constatado no gráfico da Figura 27 há o reflexo da adição de fase pelos deslocadores nos laços.

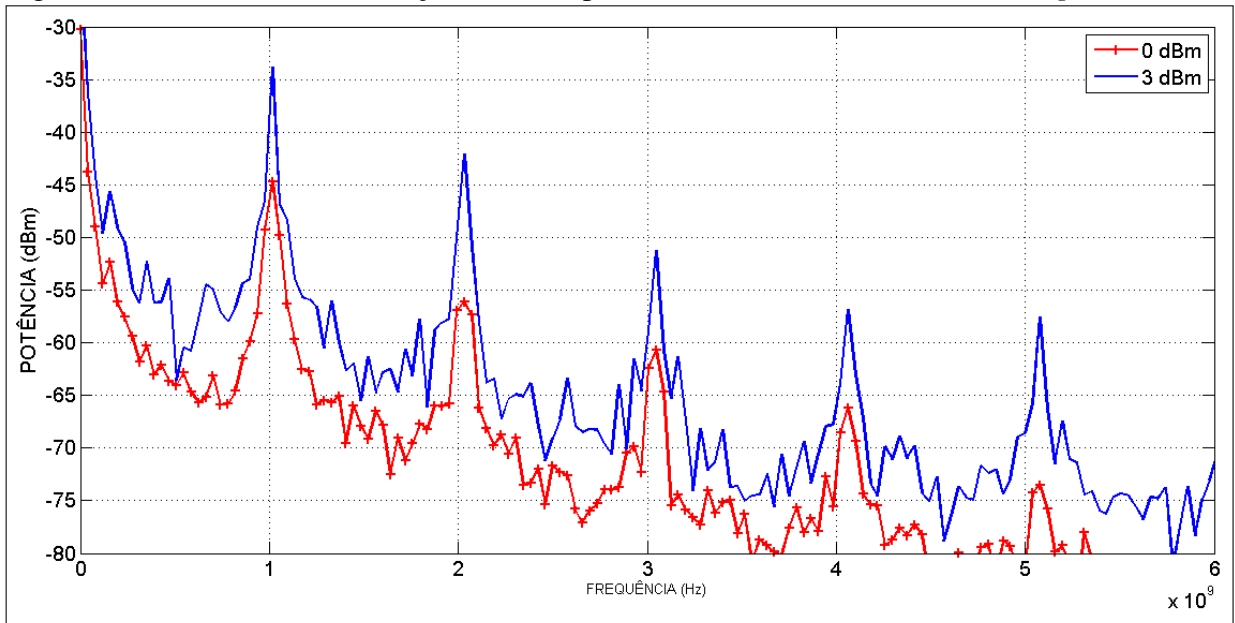
No Sistema 2 e Sistema 3 , para o caso onde não houve acréscimo de fase nos laços destes sistemas, já que tais atrasos implicam em diminuição de intensidade da potência, 31 e 30 para o Sistema 2 e Figuras 32 e 33 para o Sistema 3.

Figura 27 – Sistemas - Comparativo de potências e adição de fase no *loop*.



Fonte: O autor.

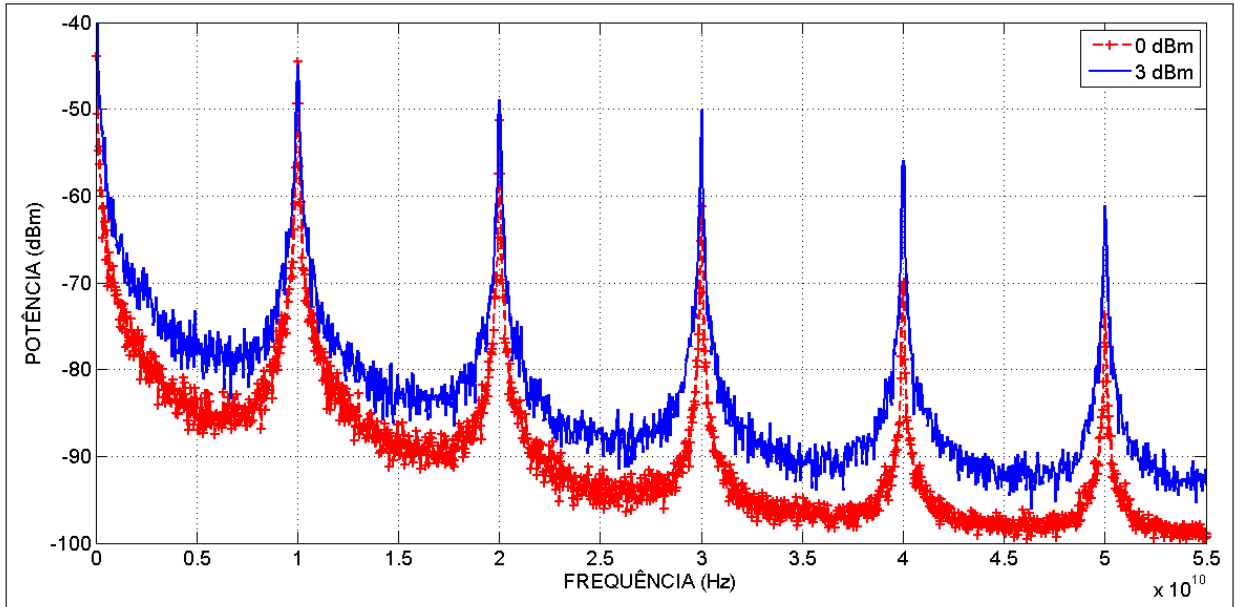
Figura 28 – Sistema 1 - Modulação 1 GHz e potências: 0 e 3 dBm sem fase no *loop*.



Fonte: O autor.

Os três sistemas apresentam-se eficientes na geração de harmônicos, embora estas não superem os em intensidade as potências de harmônicos gerados nos sistemas de modulação em amplitude. principalmente aqueles que multiplicavam a frequência do sinal modulado em até seis vezes, como visto na Seção 2.4.2, onde vimos também que o sistema multiplicador por oito utilizava amplificação na saída do segundo estágio. Os sistemas propostos tem uma aproximação do sistema proposto por (HEDEKVIST *et al.*, 2004), que utiliza modulação de fase, laço óptico e controle de polarização para quadruplicação de frequência a partir da geração da

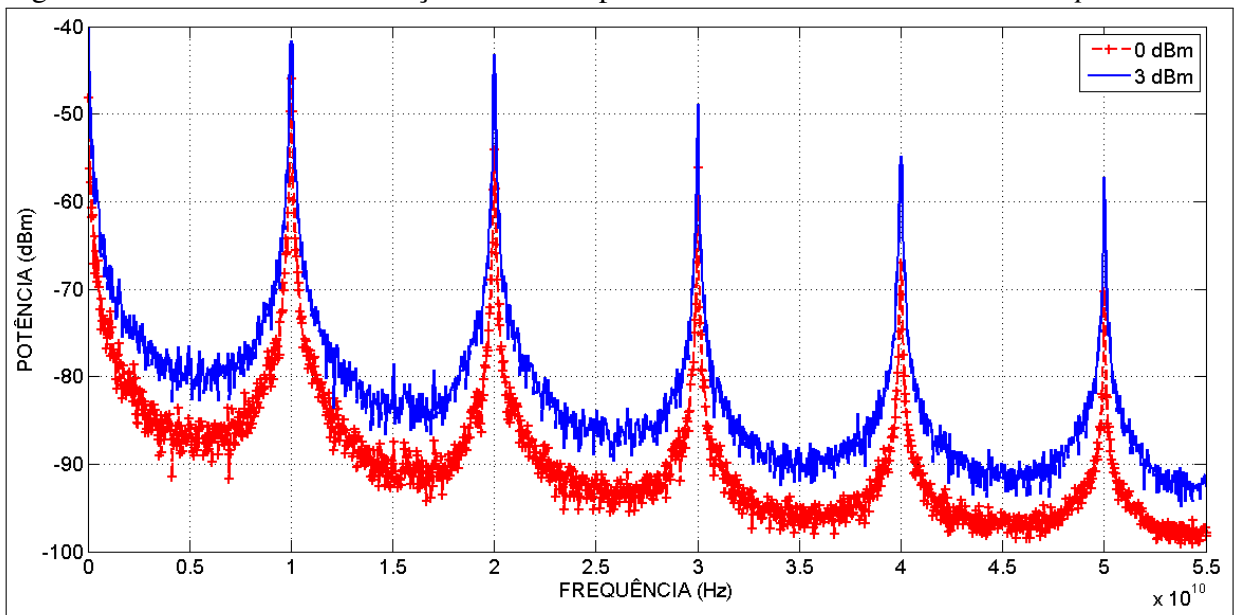
Figura 29 – Sistema 1 - Modulação 10 GHz e potências: 0 e 3 dBm sem fase no *loop*.



Fonte: O autor.

quarta harmônica exibido na Figura 14, através de espectro de frequência.

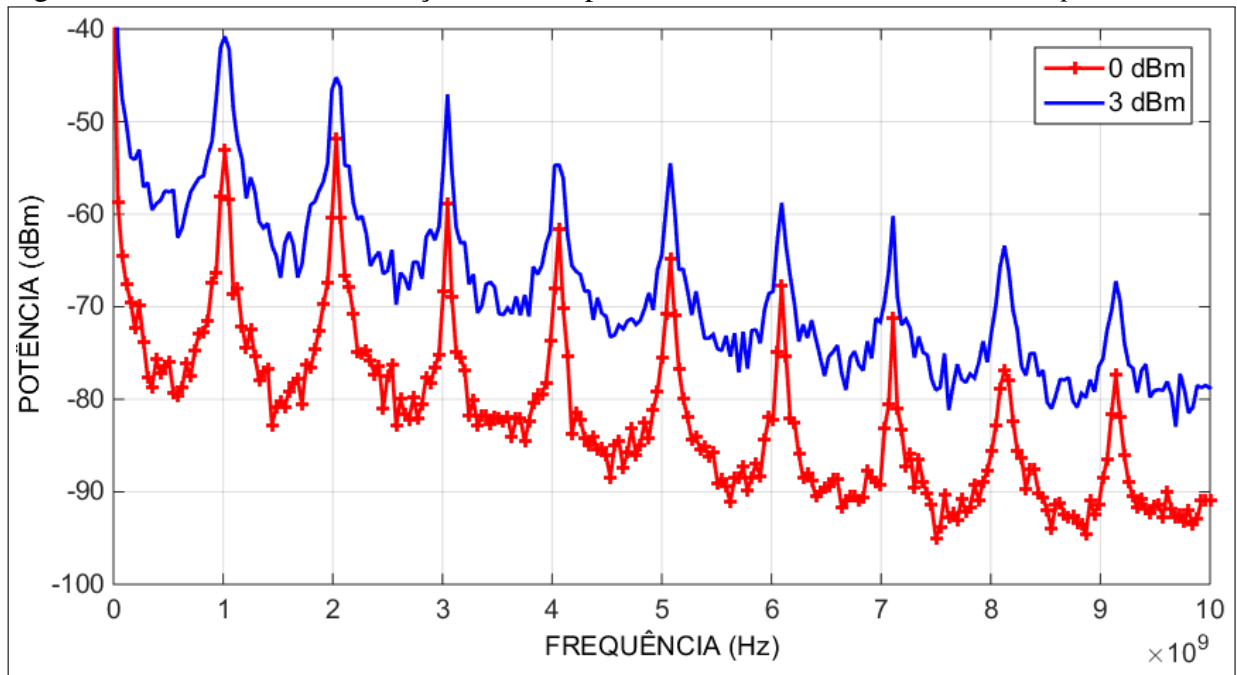
Figura 30 – Sistema 2 - Modulação 10 GHz e potências: 0 e 3 dBm sem fase no *loop*.



Fonte: O autor.

O Sistema 3, através das Tabelas 7 e 8, apresentou-se mais eficiente para a geração da segunda e terceira harmônica, as Figuras 32 e 33 ilustram essa característica, porém a melhor configuração aqui proposta para geração da quarta harmônica, foi o Sistema 2. Ainda sobre os Sistema 3 a Figura 34 exibe o comparativo entre o modelo teórico descrito pela Equação 3.1, e o modelo simulado para uma frequência modulada de 10 GHz.

Figura 31 – Sistema 2 - Modulação 1 GHz e potências: 0 e 3 dBm sem fase no *loop*.



Fonte: O autor.

Tabela 5 – Potências dos harmônicos do Sistema 2 -(dBm) - Modulação 10 GHz e potência no Laser em 0 dBm.

Harmônicos	sem fase	BS1 fase 90	BS1 fase 180	BS2 fase 90
1 ^o	-43,17	-53,27	-51,77	-52,37
2 ^o	-48,94	-53,14	-58,31	-57,16
3 ^o	-54,84	-61,31	-61,55	-63
4 ^o	-57,18	-66,07	73,27	-67
5 ^o	-62,52	-64,80	-68,53	-69,04
Harmônicos	BS2 fase 180	BS1 e BS2 fase 90	BS1 e BS2 fase 180	
1 ^o .	-46,36	-43,32	-53,27	
2 ^o	50,48	-50,58	-53,14	
3 ^o	-62,41	-53,63	-61,31	
4 ^o	-63,13	-56,11	-66,07	
5 ^o	-64,90	-65,70	-68,48	

Fonte: o autor.

Embora gere a mesma harmônica, não é capaz de atingir o mesmo nível de potência espectral do sistema de (HEDEKVIST *et al.*, 2004), em torno de -30 dBm, no Sistema 3, aqui proposto, atinge-se em torno de -51 dBm com injeção de potência óptica de 3 dBm, como é percebido nos dados da Tabela 8, pois conta apenas como mudança de parâmetro da potência do laser, alternada entre 0 dbm e 3 dbm além da mudança do comprimento do laço, através dos deslocadores de fase. Essa limitação acontece pois o *software* não dispõe mudanças de parâmetros de no índice de modulação de fase dos dispositivos virtuais de modulação de fase utilizados. No sistemas aqui propostos, o *loop* óptico induz diferença de fase entre feixes que

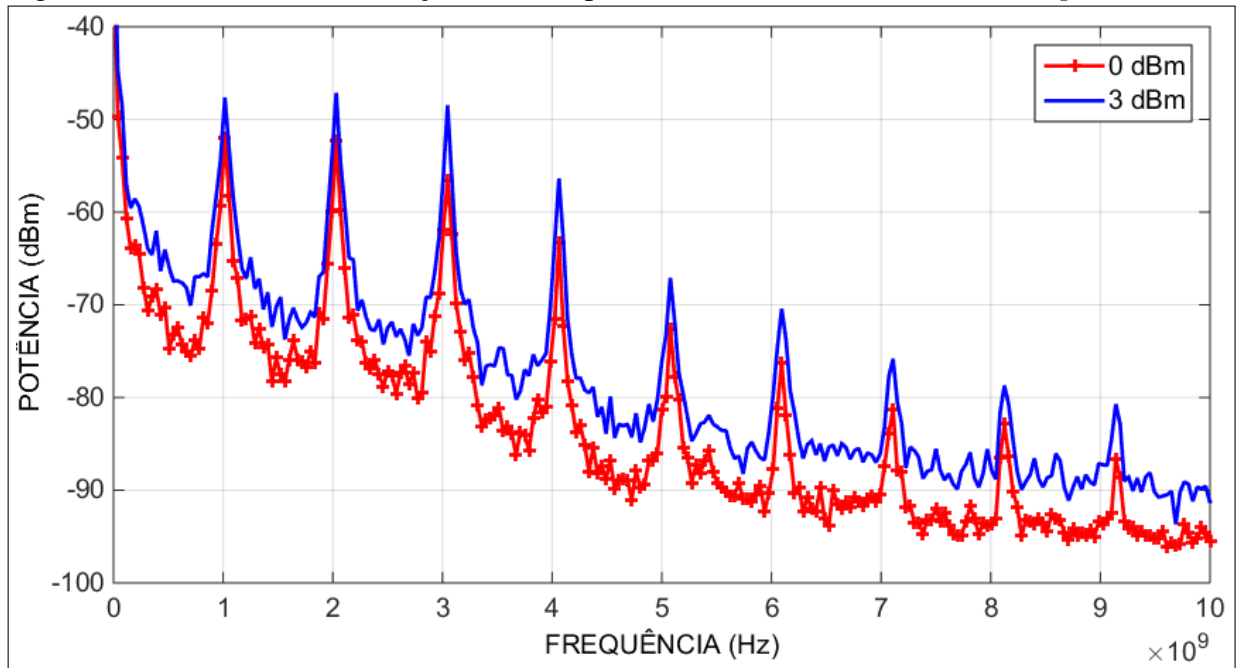
Tabela 6 – Potências dos harmônicos do Sistema 2 -(dBm) - Modulação 10 GHz e potência no Laser em 3 dBm.

Harmônicos	sem fase	BS1 fase 90	BS1 fase 180	BS2 fase 90
1 ⁰	-42,69	-53,27	-51,77	-51,27
2 ⁰	-46,94	-54,14	-58,31	-57,16
3 ⁰	-53,54	-61,31	-61,55	-63
4 ⁰	-57,01	-66,07	73,27	-67
5 ⁰	-60,22	-68,20	-69,33	-68,46

Harmônicos	BS2 fase 180	BS1 e BS2 fase 90	BS1 e BS2 fase 180
1 ⁰	-46,36	-45,32	-53,27
2 ⁰	-48,48	-52,20	-53,14
3 ⁰	-51,67	-53,00	-62,12
4 ⁰	-54,34	-55,10	-65,45
5 ⁰	-56,52	-60,70	-68,19

Fonte: o autor.

Figura 32 – Sistema 3 - Modulação 1 GHz e potências: 0 e 3 dBm sem fase no loop.



Fonte: O autor.

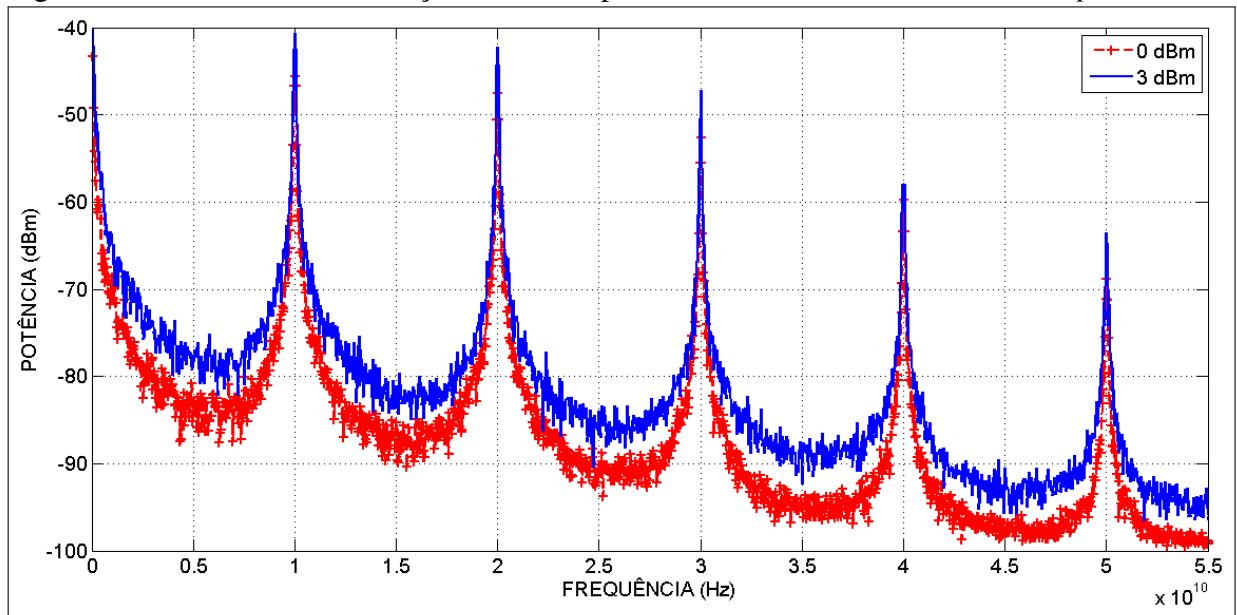
Tabela 7 – Potências dos harmônicos do Sistema 3 -(dBm) - Modulação 10 GHz e potência no Laser em 0 dBm.

Harmônicas	sem fase	fase 90	fase 180
1 ⁰	-51,46	-54,36	-54,19
2 ⁰	-55,57	-56,93	-55,16
3 ⁰	-62,81	-64,84	-64,12
4 ⁰	-65,60	-67,39	-66,60
5 ⁰	-67,52	-68,32	-67,53

Fonte: o autor.

são divididos no acoplador, conduzindo a diferença de fase, conseqüentemente no surgimento das harmônicas.

Figura 33 – Sistema 3 - Modulação 10 GHz e potências: 0 e 3 dBm sem fase no *loop*.



Fonte: O autor.

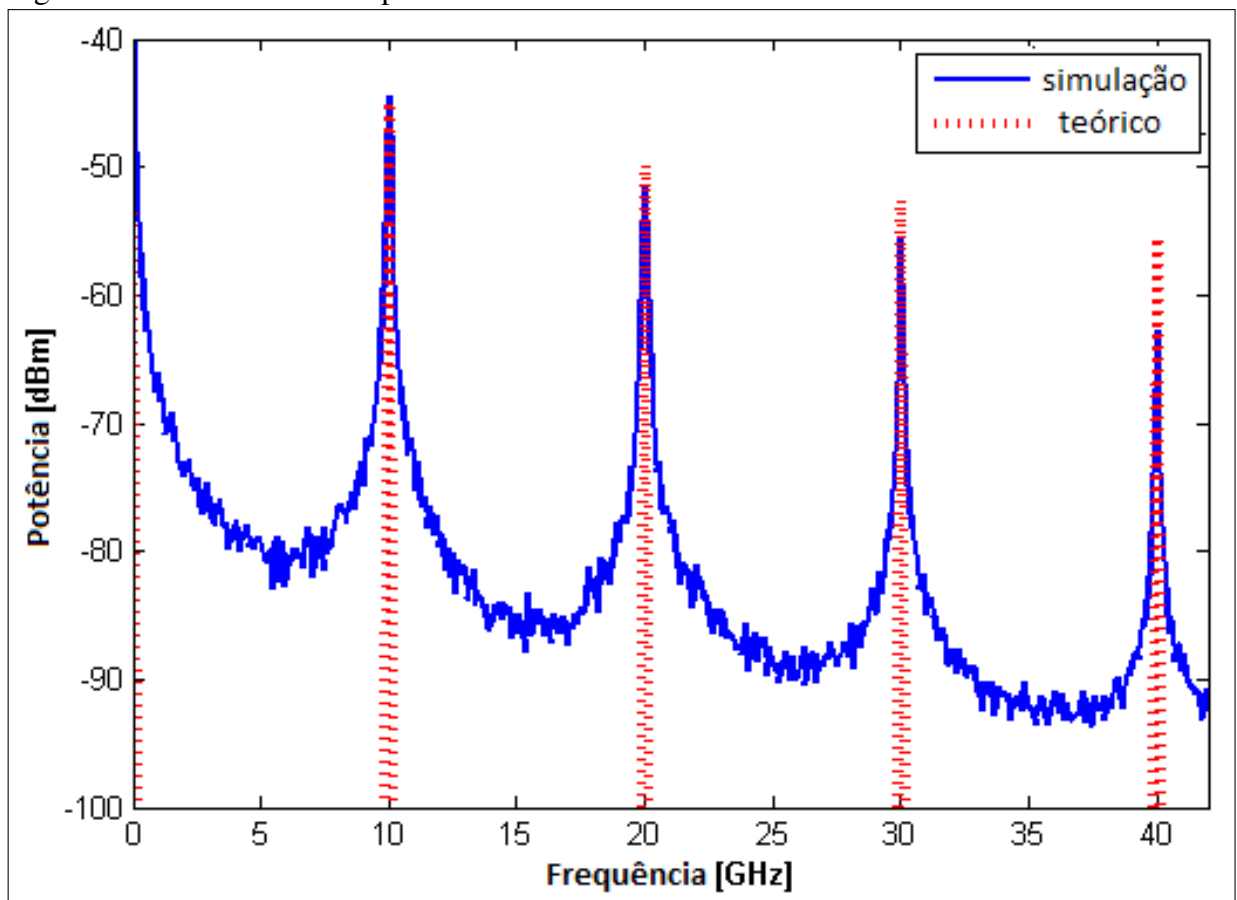
Tabela 8 – Potências dos harmônicos do Sistema 3 -(dBm) - Modulação 10 GHz e potência no Laser em 3 dBm.

Harmônicas	sem fase	fase 90	fase 180
1 ^o	-40,2	-45,72	-48,57
2 ^o	-45,19	-50,12	-49,05
3 ^o	-58,11	-60,54	-58,93
4 ^o	-63,52	-60,70	-60,53
5 ^o	-65,12	-63,43	-65,11

Fonte: o autor.

Em (HEDEKVIST *et al.*, 2004) é possível selecionar o instante e a harmônica pela seleção da tensão de polarização do modulador de fase, no caso do seu experimento *loop mirror*, a harmônica de quarta ordem foi obtida e o restante suprimido. O mesmo pode ser feito nos sistemas propostos com uso de técnicas de filtragem seletiva e amplificação na saída do fotodiodo.

Figura 34 – Sistema 3 - Comparativo entre modelo teórico e simulado.



Fonte: O autor.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho apresentou três propostas inéditas de sistemas ópticos para geração de harmônicos de sinais de micro-ondas usando modulação de fase em laços ópticos. Tais sistemas foram analisados numericamente e comparados com sistema apresentado em (HEDEKVIST *et al.*, 2004).

Sistemas computacionais tem suas vantagens, entre elas proporcionar uma vasta biblioteca de componentes e dispositivos ópticos, no caso do *Optisystem*© mais de 400 dispositivos, que só estariam disponíveis no melhor laboratório do mundo. Porém existem também limitações, nessas simulações não foi possível, por exemplo, configurar tensões de polarização em moduladores de fase, essa propriedade só é disponível em moduladores de intensidade *Mach-Zehnder*. Como foi visto na seção 2.4.2, trata-se de um parâmetro fundamental para a geração de bandas laterais para multiplicação de frequência, assim como visto na seção 2.4, onde a tensão de polarização era fixada de modo a imprimir uma diferença de fase específica para a multiplicação e seleção da componente harmônica.

Nos sistemas aqui analisados, os resultados tratados, mostraram que os três sistemas são configurações de implementação factíveis apresentando eficiência na geração da quinta (50 GHz) harmônica em comparação ao sistema proposto em (HEDEKVIST *et al.*, 2004), sendo útil assim como multiplicador de frequência. O sinal de micro-ondas gerado exibiu um ruído de fase, em decorrência da corrente de alimentação do laser ser diretamente modulada, o que leva a apresentar tal modulação angular. Entretanto nenhum dos sistemas foi desenvolvido para descrever e analisar o desempenho destes diante do ruído de fase, que pode ser estabilizado através do uso de um laser comprimento de onda estabilizado.

O Sistema 2, é um sistema de modulação tripla, foi capaz de gerar com mais eficiência a harmônica de quarta ordem, característica não observada nos Sistema 1 e Sistema 3. Entretanto pela observação das tabelas de potência, o Sistema 3 duplica e triplica a frequência do sinal modulado mais eficientemente que os outros dois sistemas.

Neste trabalho de pesquisa apresentou-se, geração de ondas milimétricas através de tecnologia fotônica, mais precisamente com base em modulação e realimentação de sinal óptico através de laços ópticos de fibra. Alcançou-se o objetivo de demonstrar a viabilidade de produzir multiplicação de micro-ondas de baixa frequência a baixo custo utilizando-se modulação externa e poucos componentes fotônicos.

Buscar soluções, utilizando a fotônica, no que diz respeito a utilização de circuitos

integrados fotônicos para aumentar significativamente a qualidade do sinal gerado será o próximo foco de pesquisa. Além disso, como observado nos modelos propostos, a frequência do sinal modulado não é suprimida, e harmônicos indesejados, provenientes de ruído são observados na saída do fotodetector, o que poderia causar resultados negativos em muitas aplicações práticas.

Assim, remoção de ruído indesejado usando um sistema de filtragem óptica é também uma das propostas de aprimoramento para um estudo futuro. Sugere-se também para trabalhos futuros: A exploração com maiores taxas de modulação dos canais ópticos, avaliar a viabilidade da geração de sinais multi-amplitude, explorar outras faixas de modulação, implementar um sistema RoF e finalmente a análise de outros tipos de modulação sobre a base da técnica apresentada.

REFERÊNCIAS

- BERTOLOTTI, M. **Masers and lasers: an historical approach**. 1. ed. [S. l.]: CRC Press, 2015.
- CAPMANY, J.; NOVAK, D. Microwave photonics combines two worlds. **Nature photonics journal**, San Francisco, CA, p. 319–330, nov. 2007. Disponível em: https://www.academia.edu/29262558/Microwave_photonics_combines_two_worlds. Acesso em: 10 jun. 2016.
- DRAGOMAN, M. D. D. **Advanced optoelectronic devices**. 1. ed. Bucharest: Springer-Verlag, 1999.
- DUTTON, H. J. **Understanding optical communications**. 1. ed. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1998. v. 1.
- GHATAK, A. **Optics**. 4. ed. New Delhi: McGraw-Hill, 2009.
- GHIONE, G. **Semiconductor devices for high-speed optoelectronics**. 1. ed. New York: Cambridge University Press, 2009.
- HEDEKVIST, P. O.; OLSSON, E. B.; WIBERG, A. Microwave harmonic frequency generation utilizing the properties of an optical phase modulator. **Journal Of Lightwave Technology**, Washington, Dc, p. 82, jun 2004. Disponível em: <https://opg.optica.org/jlt/viewmedia.cfm?uri=jlt-22-3-882&seq=0>. Acesso em: : 28 jun. 2016.
- HILT, A. Microwave harmonic generation in fiber-optical links. **Journal Of Telecommunications And Information Technology**, Budapest, p. 22–28, mar 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/914029>. Acesso em: 28 jul. 2016.
- HITZ, C. B.; EWING, J. J.; HECHT, J. **Introduction to laser technology**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- IIZUKA, K. **Engineering optics**. 1. ed. New York: Springer Science & Business Media, 2013.
- INSUA, I. G.; SCHAFFER, C. Optical microwave signal generation using a fiber loop. **Journal Of Lightwave Technology**, New York, p. 33–36, maio 2007. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4357923>. Acesso em: 28 jun. 2016.
- JONES, W. B. **Introduction to optical fiber communication systems**. London: Oxford University Press, 1995.
- KEISER, G. **Optical fiber communications**. 1. ed. New York: Wiley Library, 2003.
- KHANNA, A. Microwave oscillators: the state of the technology. **Microwave Journal**, Norwood, p. 22–23, mar 2006. Disponível em: <https://www.microwavejournal.com/articles/1169-microwave-oscillators-the-state-of-the-technology>. Acesso em: 30 jul. 2016.
- LEE, C. H. **Microwave photonics**. 1. ed. Boca Raton, FL: CRC press, 2013.
- LI, W.; YAO, J. Microwave generation based on optical domain microwave frequency octupling. **IEEE Photonics Technology Letters**, [S.l.], v. 22, n. 1, p. 24–26, jan 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/lpt.2009.2035332>. Acesso em: 10 jun. 2016.
- LIU, J.-M. **Photonic Devices**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

MAINI, A. K. **Lasers and optoelectronics: fundamentals, devices and applications**. 1. ed. New York: Wiley, 2013.

MARPAUNG, D.; ROELOFFZEN, C.; HEIDEMAN, R.; LEINSE, A.; SALES, S.; CAPMANY, J. Integrated microwave photonics. **Laser & Photonics Reviews**, [S.l.], v. 7, n. 4, p. 506–538, jan 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/lpor.201200032>. Acesso em: 18 jun. 2016.

MITSCHKE, F. **Fiber optics: physics and technology**. 1. ed. New York: Springer, 2016.

OLIVEIRA, G. L. d.; GIRAUDO, E. C.; RAMOS, R. V. Setups for harmonics generation using optical modulators. **Microwave And Optical Technology Letters**, [S.l.], v. 54, n. 2, p. 519–521, dez 2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mop.26583>. Acesso em: 30 jul. 2016.

POZAR, D. M. **Microwave engineering**. 1. ed. New York: John Wiley & sons, 2011.

PROTOPOPOV, V. V. **Laser heterodyning**. 1. ed. New York: Springer, 2009.

YAO, J. Microwave photonics: photonic generation of microwave and millimeter-wave signals. **International Journal Of Microwave And Optical Technology**, [S.l.], v. 5, p. 16–21, 2010. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4785283>. Acesso em: 10 jun. 2016.

YARIV, P. Y. A. **Photonics: optical electronics in modern communications**. 6. ed. London: Oxford University Press, 2006.

ZHANG, J.; CHEN, H.; CHEN, M.; WANG, T.; XIE, S. Photonic generation of a millimeter-wave signal based on sextuple-frequency multiplication. **Optics letters**, New York, v. 32, p. 1020–1022, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/6412201_Photonic_generation_of_a_millimeter-wave_signal_based_on_sextuple-frequency_multiplication. Acesso em: 10 jun. 2016.

ZHANG, J.; CHEN, H.; CHEN, M.; WANG, T.; XIE, S. A photonic microwave frequency quadrupler using two cascaded intensity modulators with repetitious optical carrier suppression. **IEEE Photonics Technology Letters**, [S.l.], v. 19, n. 14, p. 1057–1059, jul 2007. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4252151/similar#similar>. Acesso em: 10 jun. 2016.

ZHOU, F.; JIN, X.; YANG, B.; ZHOU, J.; ZHANG, X.; ZHENG, S.; CHI, H. Photonic generation of frequency quadrupling signal for millimeter-wave communication. **Optics Communications**, New York, v. 304, p. 71–74, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401813003982?via%3Dihub>. Acesso em: 10 jun. 2016.

ANEXO A – ARTIGO PUBLICADO

OLIVEIRA, S. T. de; MOURA, A. S.; SILVA, J. B. R. Optical setups to generate harmonicrf signals using dual optical loop and phase modulation. In: IEEE.Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2015 SBMO/IEEE MTT-S International. [S.l.],2015. p. 1–4 Disponível em <http://ieeexplore.ieee.org/document/7369226/>.