

## Capítulo 5 – Resultados Numéricos

### 5.1 - Análise dos Enlaces DD, AM, PM e FM

Neste capítulo, será avaliada a SFDR dos quatro enlaces (DD, AM, FM e PM) para uma variedade de parâmetros, assim como as exigências de laser para os enlaces AM, FM, PM e DD, necessárias para um desempenho aceitável de sistemas SCM em várias das aplicações mostradas no Capítulo 2. Os parâmetros principais dos sistemas incluem a potência do sinal, potência do oscilador local (OL), RIN, largura de linha do laser, largura de banda do sinal, e frequência intermediária (FI) do receptor. Nos exemplos considerados, o sinal ocupa uma única oitava da largura de banda disponível, para eliminar problemas com termos de intermodulação de segunda ordem [2]. Serão consideradas somente combinações de parâmetros correspondentes a dois lasers tipicamente usados em sistemas de comunicações ópticas: um laser de Nd:YAG com bombeamento e o laser de realimentação distribuída (DFB). Lasers de Nd:YAG exibem baixas frequências de oscilação de relaxamento e largura de linha estreita, e lasers DFB exibem frequências de oscilação de relaxamento altas e larguras de linha maiores. Nos cálculos seguintes, serão assumidos os dois conjuntos de parâmetros mostrados na Tabela 5.1. Será considerado também, para os enlaces coerentes, que o oscilador local tem o mesmo RIN e características de largura de linha do laser de sinal para cada caso. Os parâmetros do laser DFB são típicos de vários lasers comerciais (por exemplo, Toshiba TOI.D33SS-AHI, Fujitsu FLDISOF2KP), assim como os parâmetros do Nd:YAG (Lightwave Electronics Series 122, Amoco laser Company ALC 1320-2IFHS).

Tabela 5.1 - Parâmetros dos lasers usados nos resultados numéricos

	Laser DFB	Laser Nd:YAG
Largura de linha $\Delta\nu$	10 MHz	5 kHz
PSD do RIN - $n_R$	-155 dB/Hz	-110 dB/Hz
“Roll-off” do RIN - $f_R$	3 GHz	200 kHz

Ao longo desta análise, será considerada uma potência de ruído térmico no receptor de  $3.31 \times 10^{-22} \text{ A}^2/\text{Hz}$ , correspondendo a um resistor de  $50 \Omega$  à temperatura ambiente (Capítulo 3). Será assumido também  $b = 0.01$  (o fator de casamento entre os fotodetectores) para cada enlace, correspondendo a fotodiodos bem casados. Todos os parâmetros aqui usados têm tais valores para efeito de comparação com a literatura [12].

A Fig. 5.1 compara a SFDR dos vários enlaces versus a potência óptica transmitida normalizada do sinal ( $P_S$ ) para um laser DFB. Em potências de sinal menores que 1 mW, a SFDR do enlace DD é dominada pelo ruído térmico do receptor. Acima de 1 mW, o ruído balístico e o RIN tornam-se significantes, conforme mostra a Figura 5.2 (a). Nesta Figura, RIN é a contribuição do Ruído de intensidade relativa,  $n_{sh}$  é a contribuição do ruído balístico,  $n_{th}$  a contribuição do ruído térmico, e total é a composição de todas as contribuições.

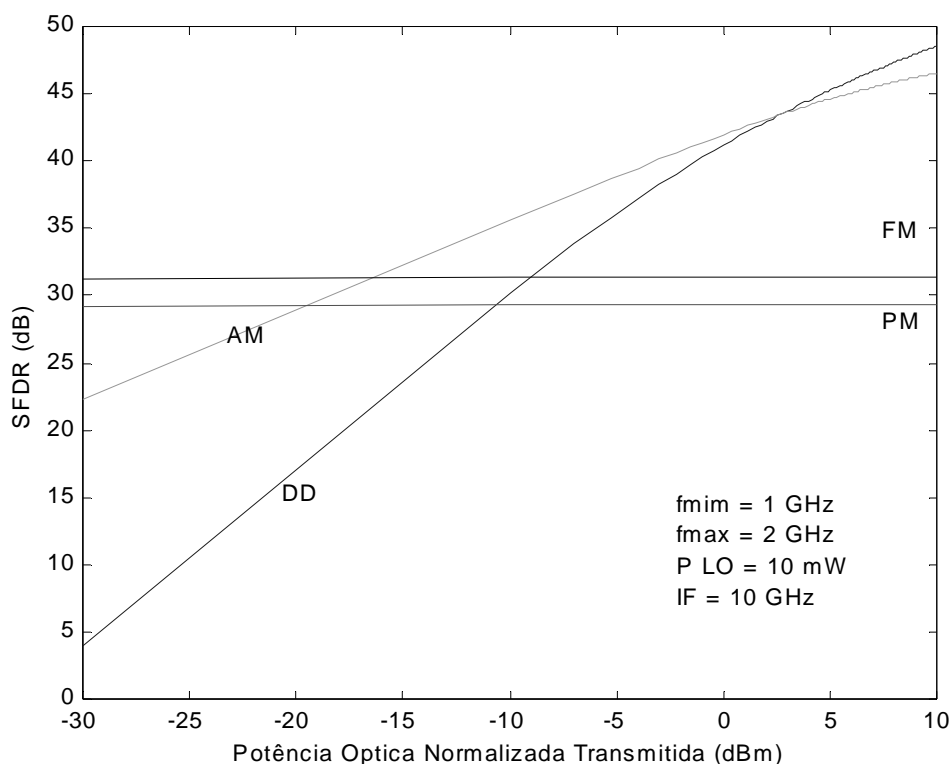


Fig. 5.1. SFDR de enlaces DD, AM, PM, e FM versus a potência óptica normalizada transmitida do sinal para um laser DFB com os parâmetros da Tabela 5.1.

No regime limitado por RIN, a SFDR do enlace DD é independente da potência do sinal. Para baixos níveis de sinal, a SFDR do enlace AM coerente é dominado pelo ruído balístico do OL, e mostra uma vantagem marcante

sobre o enlace DD. Em níveis de potência mais altos, o enlace AM coerente tem uma desvantagem intrínseca com respeito ao enlace DD devido ao RIN banda base extra e ao ruído balístico encontrados em um receptor heteródino, o que pode ser observado na Figura 5.2 (b). Nesta Figura,  $RIN_{bb}$  é a contribuição do ruído de intensidade relativa banda base,  $RIN_{bp}$  é a contribuição do ruído de intensidade relativa passa banda,  $RIN_{OL}$  é a contribuição do RIN do oscilador local,  $n_{th}$  a contribuição do ruído térmico,  $n_{sh}$  a contribuição do ruído balístico e total a composição de todas essas contribuições. Em níveis muito baixos de potência de sinal ( $< -45$  dBm), a SFDR dos enlaces PM e FM é dominada pelo ruído balístico do OL. Porém, acima de  $-45$  dBm, o ruído de fase é dominante e a SFDR é essencialmente independente do nível de potência do sinal para enlaces PM e FM (Figura 5.3 (a) e (b)). Os resultados mostrados nas Figuras 5.1 a 5.2 são coerentes com os publicados por [12]. Na Fig. 5.4, a SFDR é mostrada em função da Potência Óptica Normalizada Transmitida ( $P_s$ ) para os parâmetros do laser Nd:YAG da Tabela 5.2. Em baixos níveis de potência do sinal, o comportamento dos enlaces DD e AM é idêntico ao do diodo laser. Porém, a níveis de potência altos, o baixo RIN do laser Nd:YAG resulta em uma SFDR mais alta para ambos enlaces (AM e DD). Os enlaces PM e FM exibem melhorias significativas de desempenho comparados ao caso do diodo laser, melhorias estas devidas quase completamente a diminuição do ruído de fase do laser Nd:YAG. Os enlaces PM e FM exibem maior SFDR que o enlace DD até um nível de potência de sinal de 10 dBm. A Fig. 5.5 mostra um gráfico de SFDR versus largura de linha do laser para os enlaces PM e FM com valores de  $P_s$  de -30, -15, e 0 dBm. Foram escolhidos o nível de RIN e a frequência de “roll-off” do RIN para melhor representatividade dos diodos lasers da Tabela 5.1. Os lasers de sinal e oscilador local são ambos considerados como tendo a mesma largura de linha para cada ponto do gráfico. Devido à imunidade inerente dos enlaces PM e FM ao RIN, as curvas para os parâmetros de RIN do Nd:YAG serão quase idênticas. Em baixas potências recebidas, a largura de linha tem pequeno impacto desde que o ruído total é dominado pelo ruído térmico. Para altos níveis de potência recebida, o impacto do ruído de fase nos enlaces FM e PM é severo, com a SFDR sendo reduzida de 7 dB para cada fator de 10 de acréscimo na largura de linha

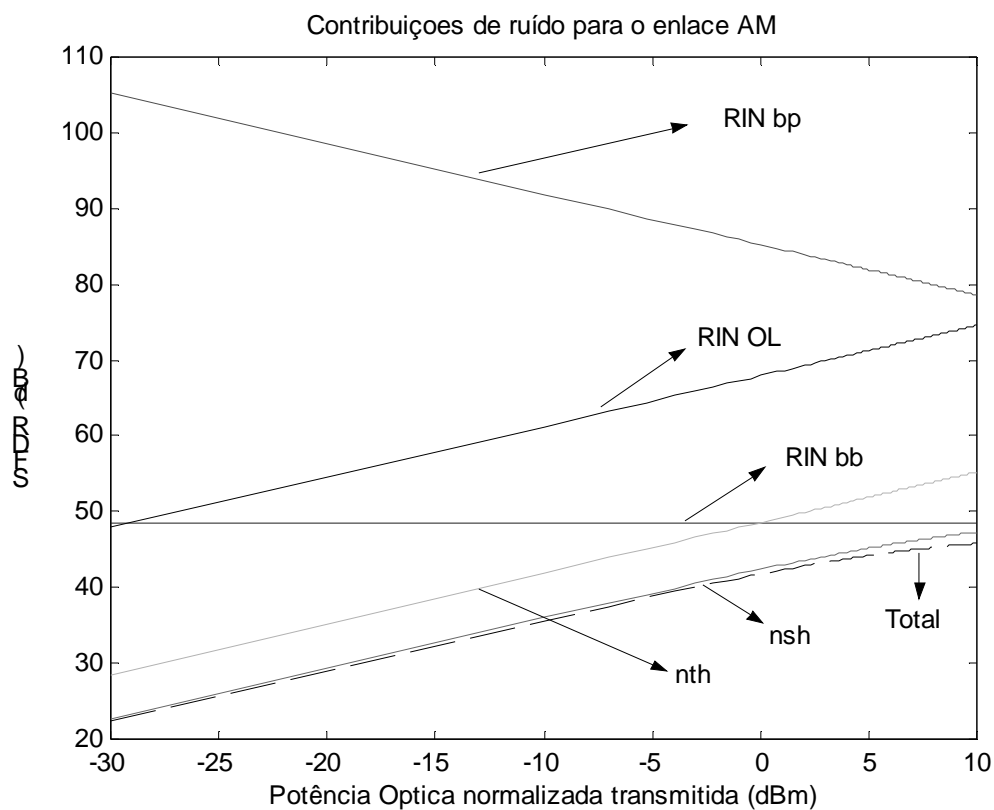
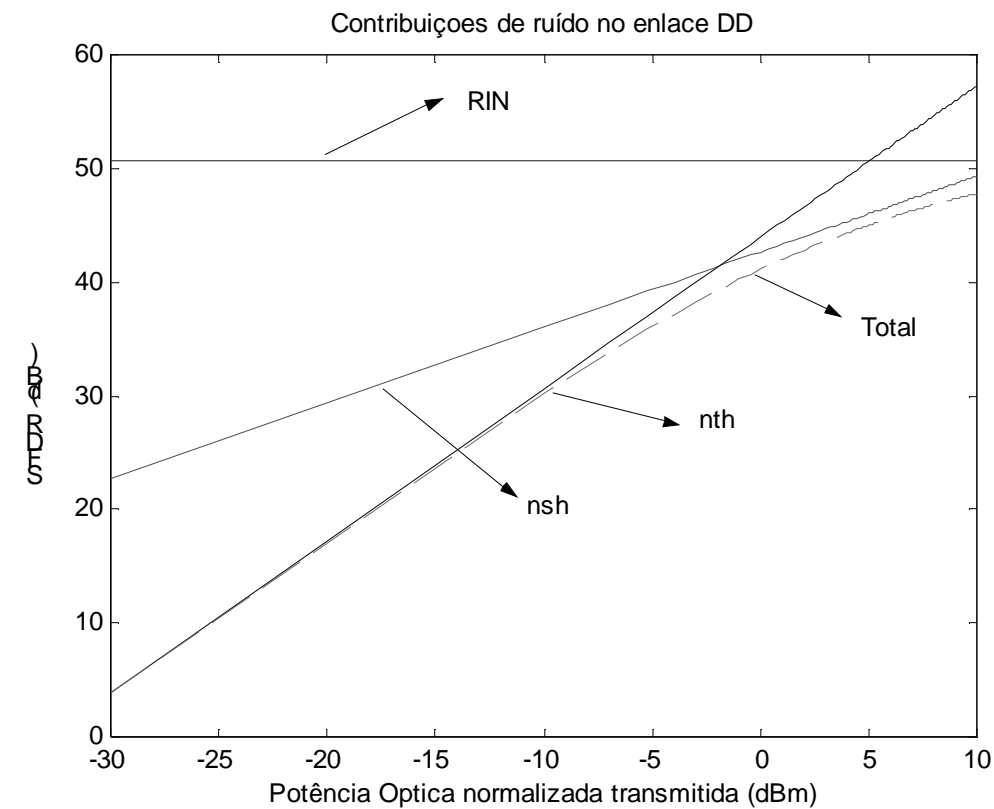
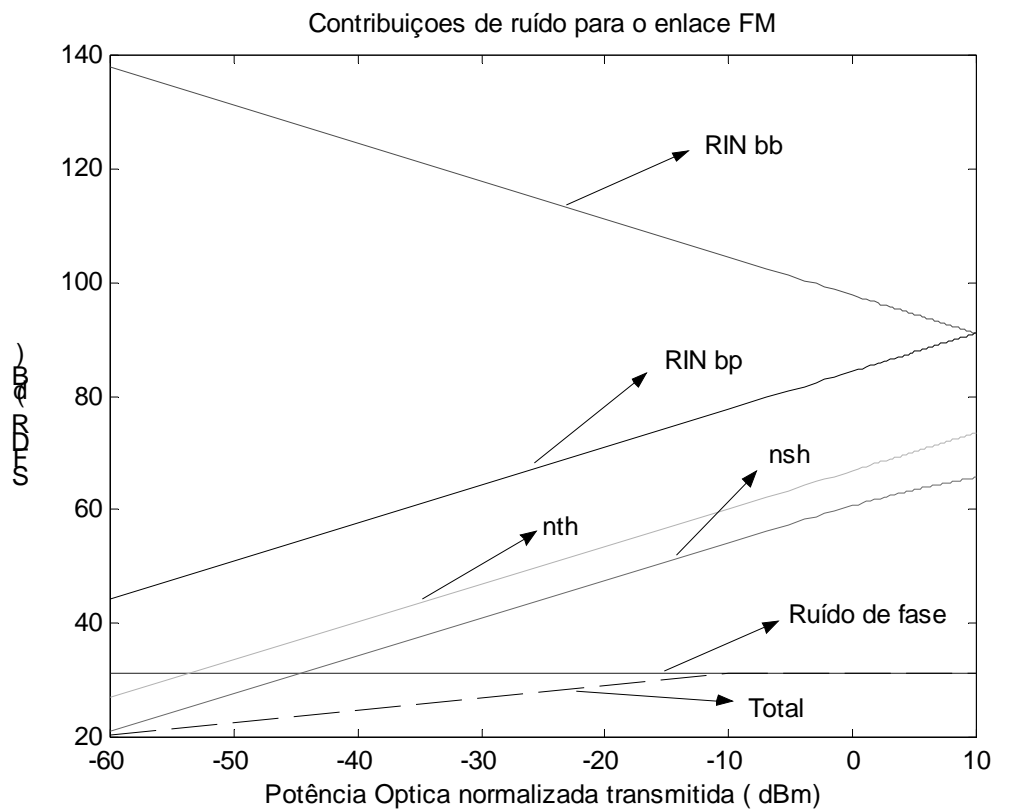


Figura 5.2 – Principais contribuições individuais de ruído para os enlaces (a) detecção direta (DD) e (b) Modulação em Amplitude (AM)



a )

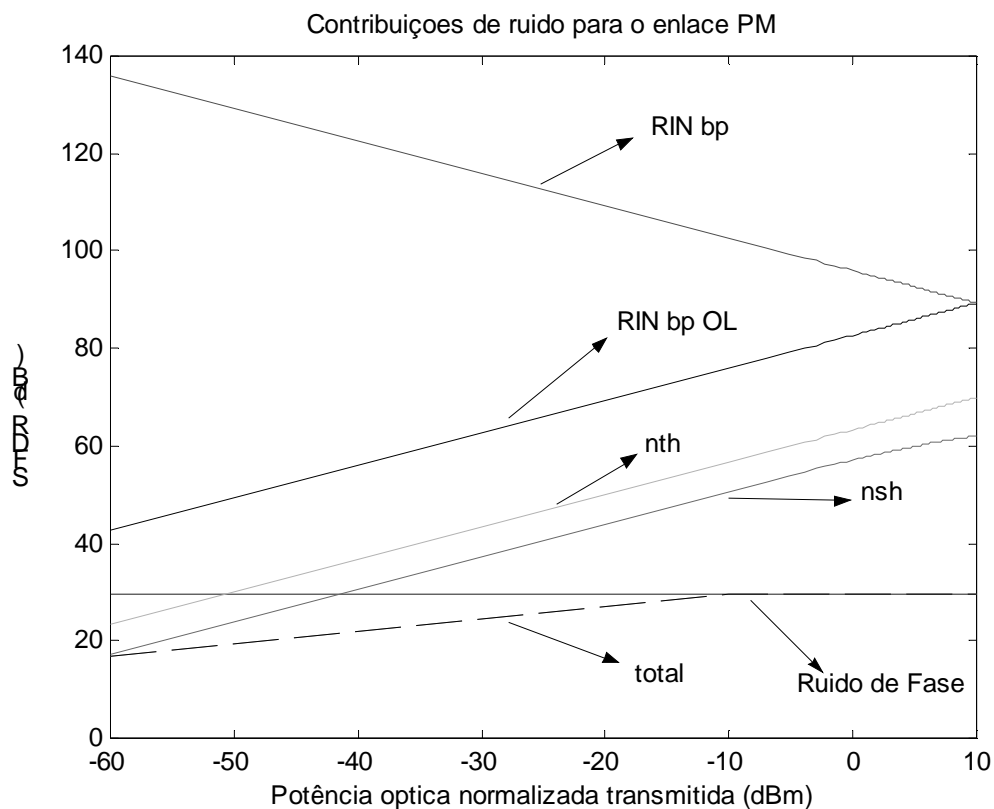


Figura 5.3 – Principais contribuições individuais de ruído para os enlaces (a) com Modulação em Frequência (FM) e (b) Modulação em Amplitude (AM) em função da potência óptica normalizada transmitida ( $P_s$ )

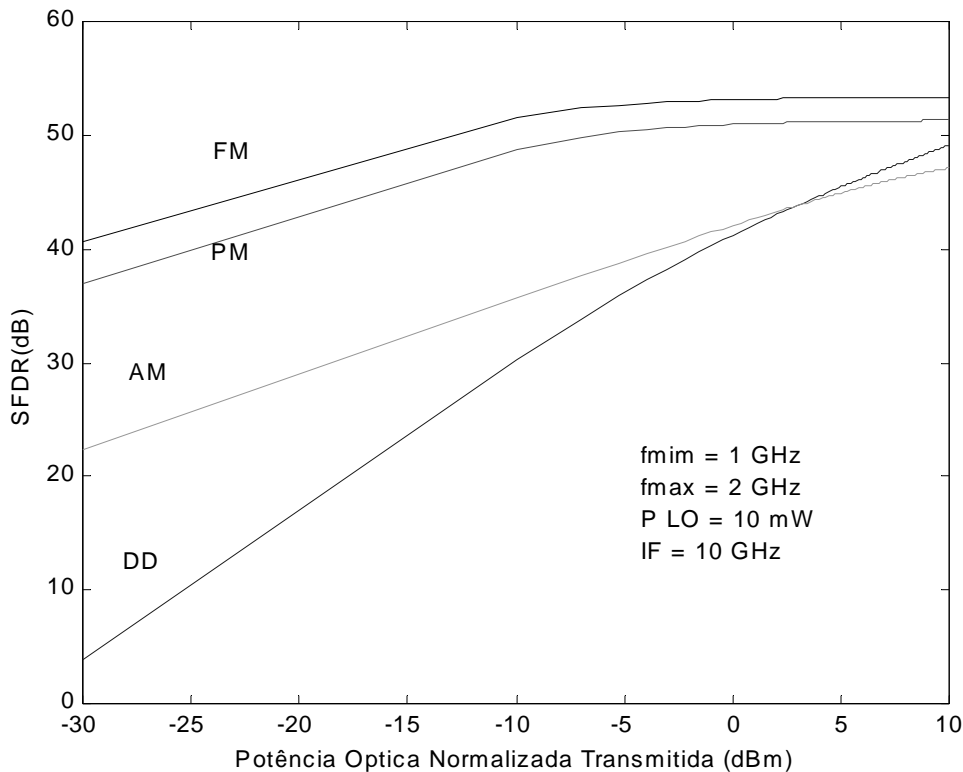


Fig. 5.4. SFDR de enlaces DD, AM, PM, e FM em função da potência óptica normalizada transmitida do sinal para um laser Nd:YAG com os parâmetros da Tabela 5.1.

A níveis de potência de sinal de -30, -15, e 0 dBm, o ruído de fase se torna dominante sobre todos os outros ruídos para larguras de linha de 400 kHz e 20 kHz, respectivamente para o enlace FM (Fig 5.6 (a) e (b)) e 600 kHz e 30 kHz, para o enlace PM (Fig 5.7 (a) e (b)). As contribuições de ruído para potências ópticas transmitidas de 0 e -30 dBm em ambos os enlaces podem ser vistas nas Fig. 5.6 e 5.7. A Fig. 5.8 mostra um gráfico de SFDR versus RIN para enlaces DD e AM com valores de  $P_S = -20, -10, \text{ e } 0$  dBm. A frequência de “roll-off” do RIN é de 3 GHz. Devido à imunidade inerente dos enlaces DD e AM ao ruído de fase, estas curvas serão independentes da escolha de largura de linha de laser.

A níveis de potência de sinal de -20, -10, e 0 dBm, o enlace DD começa a ter melhor desempenho que o enlace AM para valores de RIN em -110, -128, e -149 dB/Hz, respectivamente. Para altos valores de potência óptica recebida e RIN, a SFDR é reduzida em aproximadamente 7 dB para cada 10 dB/Hz de aumento do RIN.

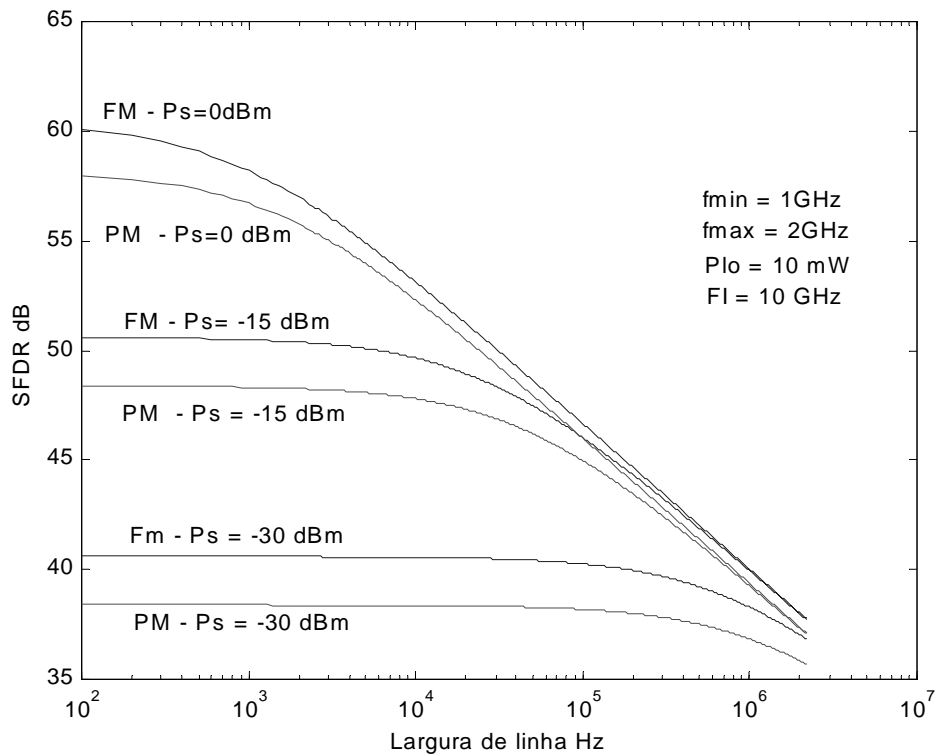
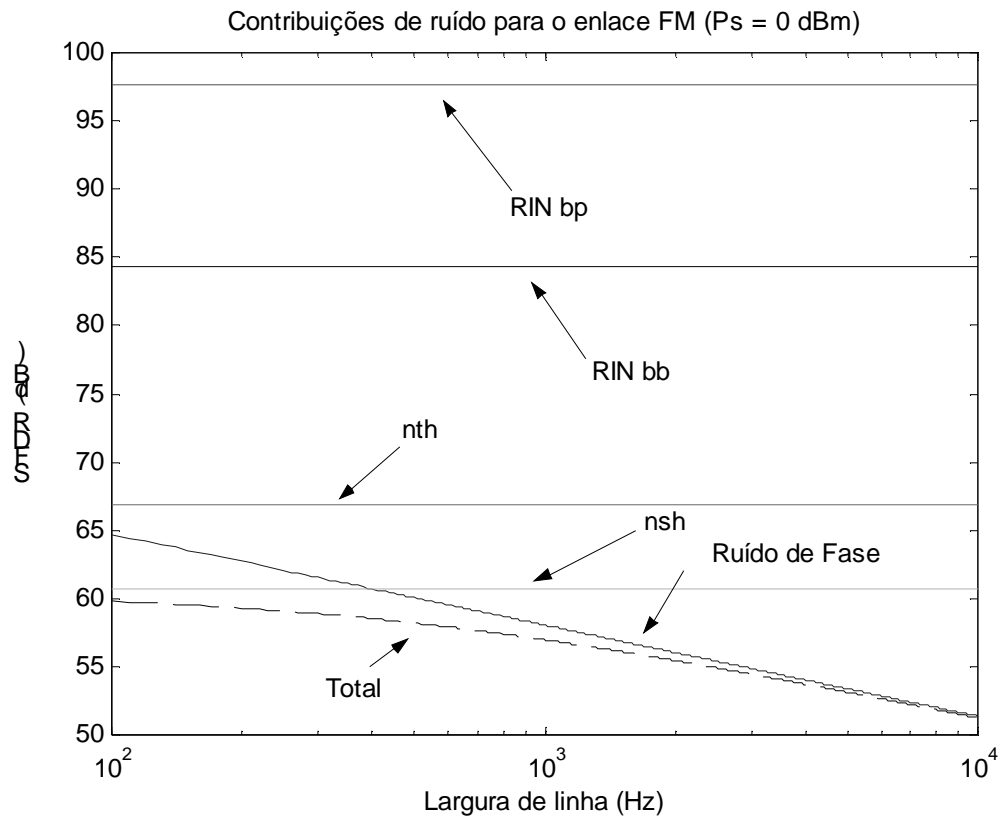
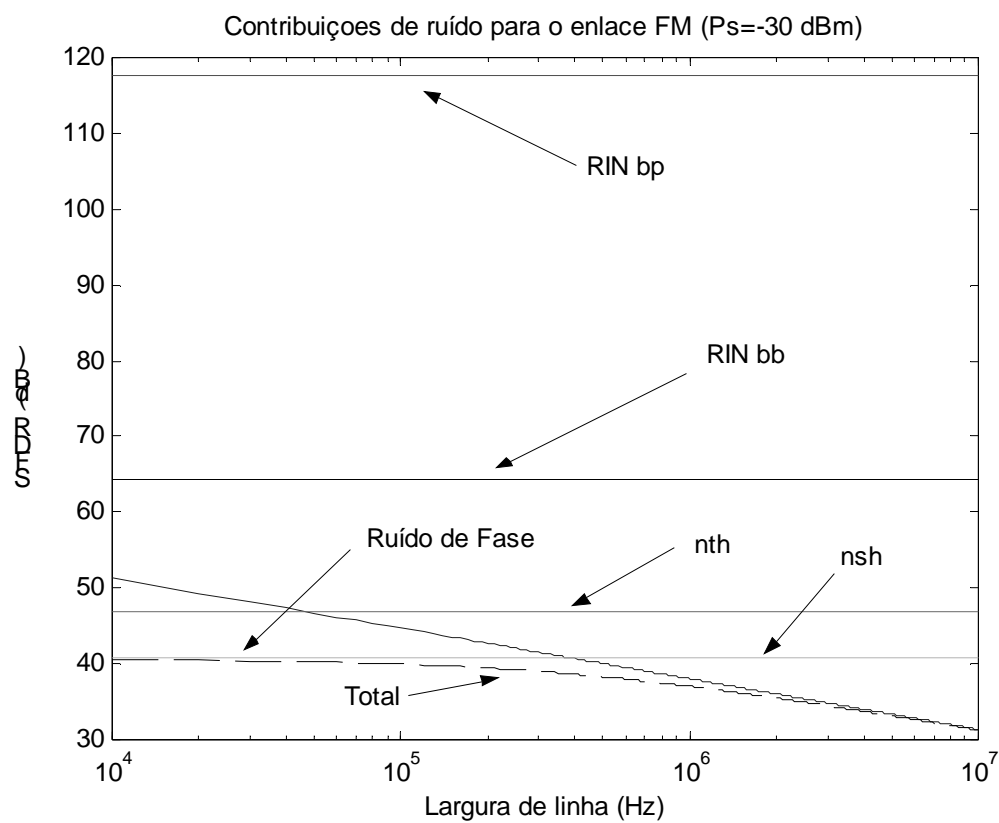


Fig. 5.5 - SFDR de enlaces PM e FM em função da largura de linha do laser para potências ópticas normalizadas transmitidas de 0, -15 e -30 dBm.

A Fig. 5.9 mostra a SFDR dos enlaces PM e FM versus a frequência intermediária (FI). Os dois conjuntos de curvas correspondem aos dois lasers considerados (ver Tabela 5.2). Para uma largura de banda do sinal de 1 GHz, aumentando a FI de 5 para 25 GHz causa um aumento da SFDR de aproximadamente 10 dB para todos os quatro casos mostrados. O aumento da SFDR é devido a duas causas: 1) A linearidade melhorada do discriminador de frequência (que é utilizado nos enlaces PM e FM –ver o valor de  $b_3$  na Tabela 5.1), e 2) o reduzido RIN para frequências acima da frequência de “roll-off” do RIN. Nos enlaces considerados, a redução em RIN devido ao “roll-off” tem um papel muito mais significativo em enlaces que usam receptores com um único fotodetector que em enlaces que usam receptores balanceados. Pela análise das figuras anteriores nota-se que em baixos níveis de potência recebida ( $P_s < 100 \mu W$ ), enlaces coerentes mostram vantagens notáveis de SFDR sobre enlaces de detecção direta.



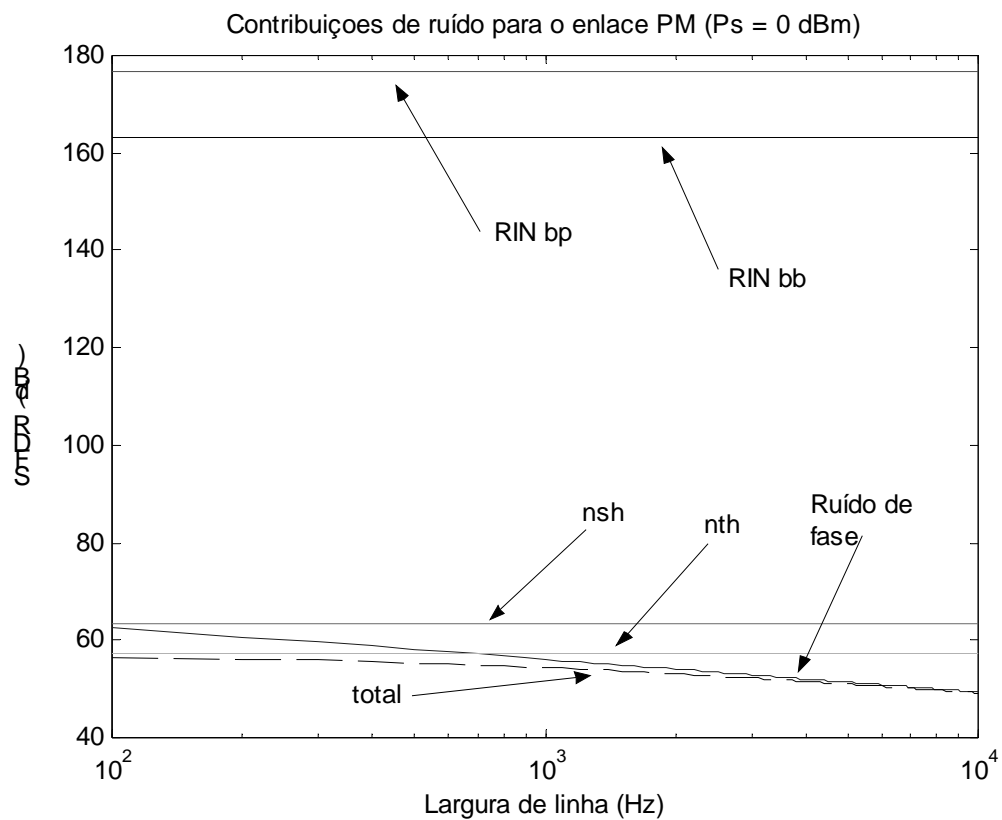
a)



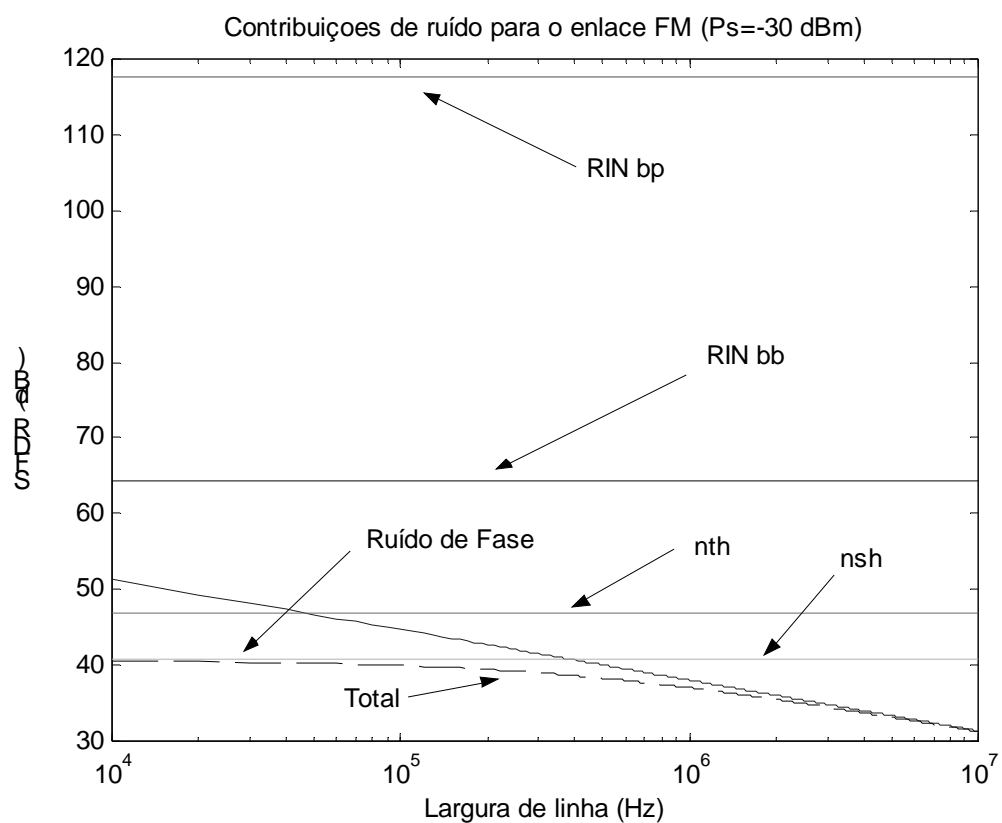
b )

Figura 5.6 – Principais contribuições de ruído para o enlace com modulação em Frequência (FM) em função da largura de linha do laser para uma potência normalizada transmitida ( $P_s$ ) de: (a) 0 dBm e (b) -30 dBm





a )



b)

Figura 5.7– Principais contribuições de ruído para o enlace com modulação em Fase (PM) em função da largura de linha do laser para uma potência normalizada transmitida ( $P_s$ ) de (a) 0 dBm e (b) -30 dBm

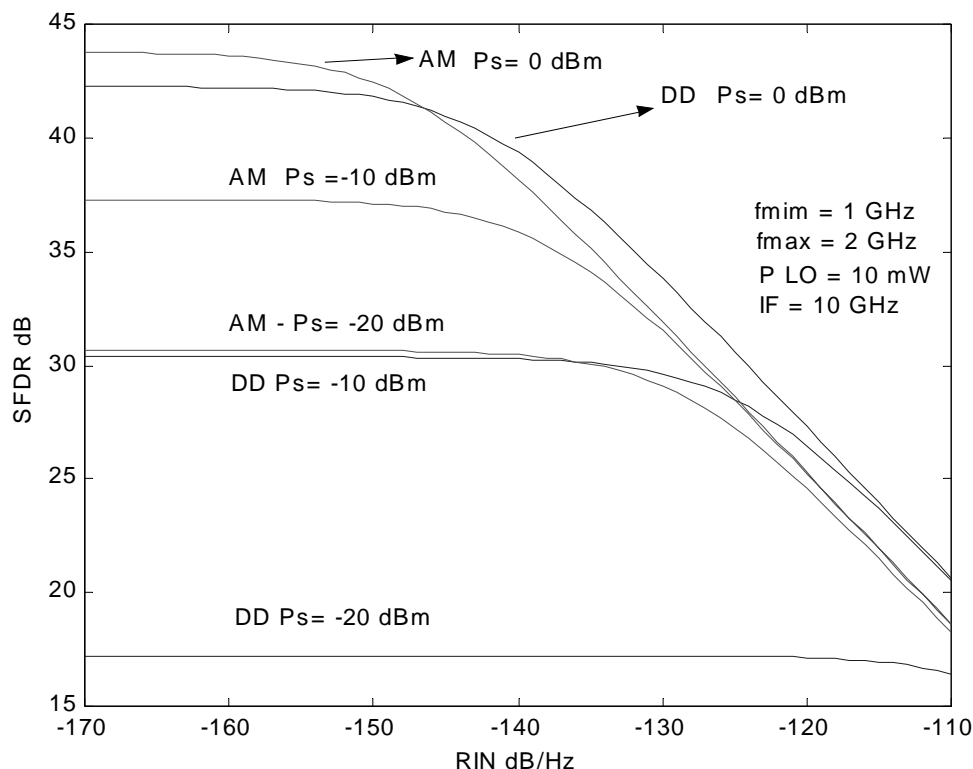


Fig. 5.8. - SFDR de enlaces DD e AM versus RIN para potências ópticas normalizadas transmitidas de 0, -10 e -20 dBm.

Isto é esperado porque o oscilador local “puxa” o sinal detectado para níveis mais altos, e assim permite a operação no limite de ruído balístico para níveis de potência do OL maiores que, aproximadamente, 1 mW.

Enlaces DD e AM são intrinsecamente suscetíveis ao RIN porque o seu sinal de informação é contido no envelope do campo elétrico do laser de sinal. Por esta mesma razão, DD e AM são intrinsecamente insensíveis ao ruído de fase. Para enlaces DD e AM com lasers tendo uma PSD do RIN de -155 dB/Hz, o RIN torna-se o termo de ruído dominante para  $P_s > 3$  dBm. Se a frequência de “roll-off” do RIN está abaixo das frequências do sinal banda base (máximo de 2,5 GHz nos exemplos anteriores), a degradação de desempenho induzida pelo RIN estará substancialmente reduzida; tal é o caso para os parâmetros do laser Nd:YAG na Tabela 5.1. Como a potência óptica recebida e o RIN são diminuídos, o desempenho do enlace AM melhora relativamente ao do enlace DD devido a insensibilidade de enlaces coerentes ao ruído térmico do receptor. Em sistemas onde RIN é o ruído dominante, o enlace de DD tem uma vantagem inerente sobre o enlace AM coerente devido à presença do RIN do oscilador local no sistema AM.

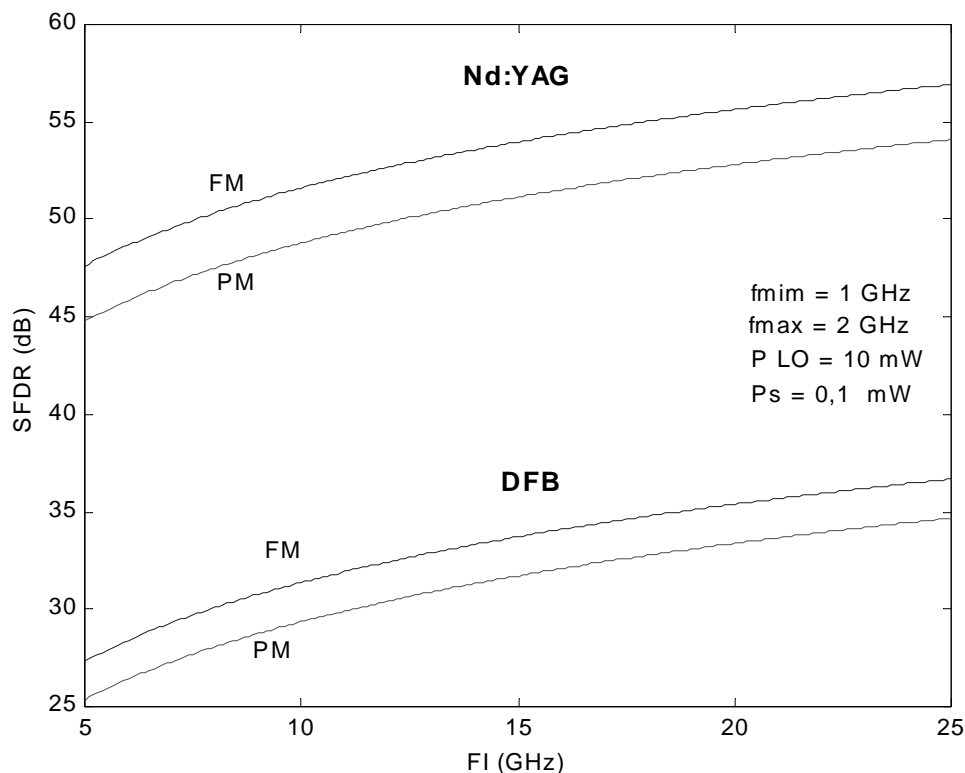


Fig. 5.9 - SFDR de enlaces PM e FM em função da Frequência Intermediária (FI) para os dois conjuntos diferentes de parâmetros de laser. A potência óptica normalizada transmitida está fixa em 0.1 mW.

Nos enlaces AM coerentes, o RIN do OL pode ser o termo de ruído dominante, podendo resultar em SNR e SFDR substancialmente reduzidas.

É bem conhecido que um receptor balanceado pode ser usado para suprimir o RIN do OL [15]. Os termos convoluídos com  $\Delta h(t)$  em (4.13-e) e (4.20) são devidos à auto-homodinação entre o sinal e o campo do OL. O ruído devido a estes termos que caem dentro da banda passante de FI é o RIN passa banda, discutido no Capítulo 3 juntamente com outros termos do RIN. O “roll-off” do RIN começa a uma frequência relacionada à frequência de oscilação de relaxamento do laser. Se a FI é substancialmente mais alta que esta frequência de “roll-off”, então o impacto do RIN será reduzido, e a necessidade de suprimir o RIN usando um receptor balanceado é diminuída. Deve ser notado que os “termos cruzados” do RIN heteródino, associados com a heterodinagem entre os campos do sinal e do oscilador local, não serão reduzidos pelo uso de um receptor balanceado, e estes termos não serão afetados assim por  $\Delta h(t)$ .

Para os enlaces PM e FM a baixos níveis de potência, os ruídos balístico e térmico dominam os efeitos do ruído de fase, e exibem então um desempenho superior a AM e DD. Para uma largura de linha do laser de 10 MHz, o ruído de fase domina o desempenho do enlace para  $P_S > -30$  dBm. Para uma largura de linha do laser de 5 kHz, o ruído de fase domina o desempenho do enlace para  $P_S > -5$  dBm. As Figs. 5.1 a 5.9 mostram que, para o desempenho dos enlaces PM e FM exceder o de um enlace DD a um nível de potência recebida de 0 dBm, a largura de linha combinada do sinal e do laser OL deve ser  $< 200$  kHz. Nos enlaces PM e FM, um receptor balanceado suprime a auto – homodinagem dos termos do RIN, como é o caso em AM. Porém, considerando que não há nenhuma informação no envelope do sinal de PM e FM, estes sistemas podem usar um limitador para suprimir o RIN heteródino, resultando então em enlaces PM e FM completamente insensíveis ao RIN.

## **5.2 - Requisitos do Sistema SCM**

Serão analisados a seguir os requisitos de operação para vários sistemas SCM (multicanal), incluindo televisão a cabo (AM-CATV, FM-CATV), redes digitais com multiplexação de subportadora e sistemas rádio – fibra, tendo suas faixas dinâmicas necessárias mostradas na Tabela 5.2. Nas Figuras 5.10 a 5.16 estes requisitos de faixa dinâmica serão destacados por uma linha pontilhada. Os sistemas comparados têm largura de banda variando de 600 KHz a 2,5 GHz. As larguras de bandas de canais individuais em cada aplicação são bastante diferentes, assim, a largura de linha, RIN, e exigências de potência óptica descritas nesta seção não devem ser usadas para comparar formatos de SCM e sim o desempenho dos quatro enlaces.

Parâmetros de sistemas como FI e potência do OL são iguais aos dos sistemas monocal. Uma banda de guarda razoável entre canais SCM é levada em conta no cálculo da largura de banda do sinal total para cada aplicação da Tabela 5.2. A faixa de frequência do sinal para cada aplicação é escolhida como uma única oitava, também para evitar problemas com termos de intermodulação de terceira ordem. Será considerado um número suficientemente grande de canais ( $N > 20$ ) em cada sistema SCM para que a

expressão multicanal de SFDR mostrada (4.38) seja válida. Nos casos em que  $N < 20$  (Rádio-fibra, Distribuição Banda Larga e “Antenna Remoting”), a equação (4.37) será usada para obtenção dos resultados, sem as simplificações da equação (4.38). Em todos os casos vale ressaltar que o canal com o pior caso de SFDR é usado para definir se desempenho do sistema é aceitável para uma determinada aplicação. O pior caso para o enlace FM nesta seção combina o produto de intermodulação na frequência do canal central e o ruído de canal de frequência mais alta. Esta hipótese provê um limite inferior de SFDR de aproximadamente 1 dB para as aplicações de interesse. Um resumo das exigências de dispositivo simuladas é mostrado na Tabelas 5.3 e 5.4.

Para sistemas de CATV AM, uma SFDR de 50 dB é necessária em uma largura de banda de 4 MHz [9]. A uma potência normalizada transmitida ( $P_S$ ) de 1 mW, é necessária uma largura de linha de  $<1$  kHz no sistema PM e de  $<3$  kHz no sistema FM, conforme a Figura 5.10 (a). Até mesmo a uma  $P_S$  de 10 mW, tal faixa dinâmica é inalcançável para sistemas DD e AM sem linearização do modulador: para o enlace DD, o menor valor de potência que preenche os requisitos é de 50 mW, com intensidade do RIN de  $-178$  dB/Hz. O enlace AM não alcança esta faixa até mesmo para uma potência de 100 mW.

Em sistemas de “Antenna Remoting”, uma faixa dinâmica de 55 dB em uma largura de banda de 1GHz, ou  $115 \text{ dB.Hz}^{2/3}$ , é representativa das necessidades do sistema. Na ausência de técnicas de linearização, isto requer uma largura de linha menor que 2 kHz para um sistema PM ou de  $<4$  kHz em um sistema FM para uma  $P_S$  de 1 mW, mostra-se na Figura 5.11 (a).

Neste nível de potência, esta exigência de faixa dinâmica está inacessível para DD ou AM. Se  $P_S$  é aumentada para 50 mW, então o sistema de DD pode alcançar a faixa dinâmica necessária para um nível de RIN de  $<-170$  dB/Hz. Até mesmo para uma  $P_S$  de 100 mW, o sistema AM é incapaz de satisfazer as exigências, como mostram as figuras 5.10 (b) e 5.11 (b) .

Tabela 5.2 - SFDR necessária para várias aplicações

	CATV AM	CATV FM	SCM digital	Radio Fibra	Distribuição Banda larga	LAN	Antenna Remoting
SFDR	50 dB	17 dB	17 dB	73dB	17 dB	17 dB	55 dB
Banda do canal	4 MHz	30 MHz	10 MHz	30 kHz	280 MHz	20 MHz	1 GHz
N <sup>o</sup> de canais	100	25	80	8	8	100	1
Banda total do sinal	600 MHz	1 GHz	1 GHz	600 KHz	2,5 GHz	2 GHz	1 GHz

Tabela 5.3 - Largura de linha máxima para que enlaces PM e FM preencham os requisitos de SFDR mostrados na Tabela 5.2 para vários níveis de potência normalizada transmitida

Aplicação	Potência Normalizada Transmitida	Largura de linha PM	Largura de linha FM
CATV AM	1 mW	1 kHz	3 kHz
CATV FM	1 $\mu$ W	150 MHz	350 MHz
SCM digital	1 $\mu$ W	80 MHz	200 MHz
Rádio Fibra	1 mW	5 KHz	5,5 KHz
Distribuição Banda larga	1 $\mu$ W	50 MHz	100 MHz
LAN	1 $\mu$ W	380 MHz	700 MHz
Antenna remoting	1 mW	2 kHz	4 kHz

Tabela 5.4 - RIN máximo para que enlaces DD e AM preencham os requisitos de SFDR mostrados na Tabela 5.2 para vários níveis de potência normalizada transmitida

Aplicação	Potência Normalizada Transmitida	RIN DD	RIN AM
CATV AM	50 mW	-178 dB/Hz	45 dB máx.
CATV FM	20 $\mu$ W	16 dB máx.	-140 dB/Hz
SCM digital	20 $\mu$ W	14 dB máx.	-130 dB/Hz
Rádio Fibra	100 mW	53 dB máx	44 dB Máx.
Distribuição Banda larga	1 mW	-106 dB/Hz	-102 dB/Hz
LAN	1 mW	-132 dB/Hz	-123 dB/Hz
Antenna remoting	50 mW	-168 dB/Hz	51 dB máx.

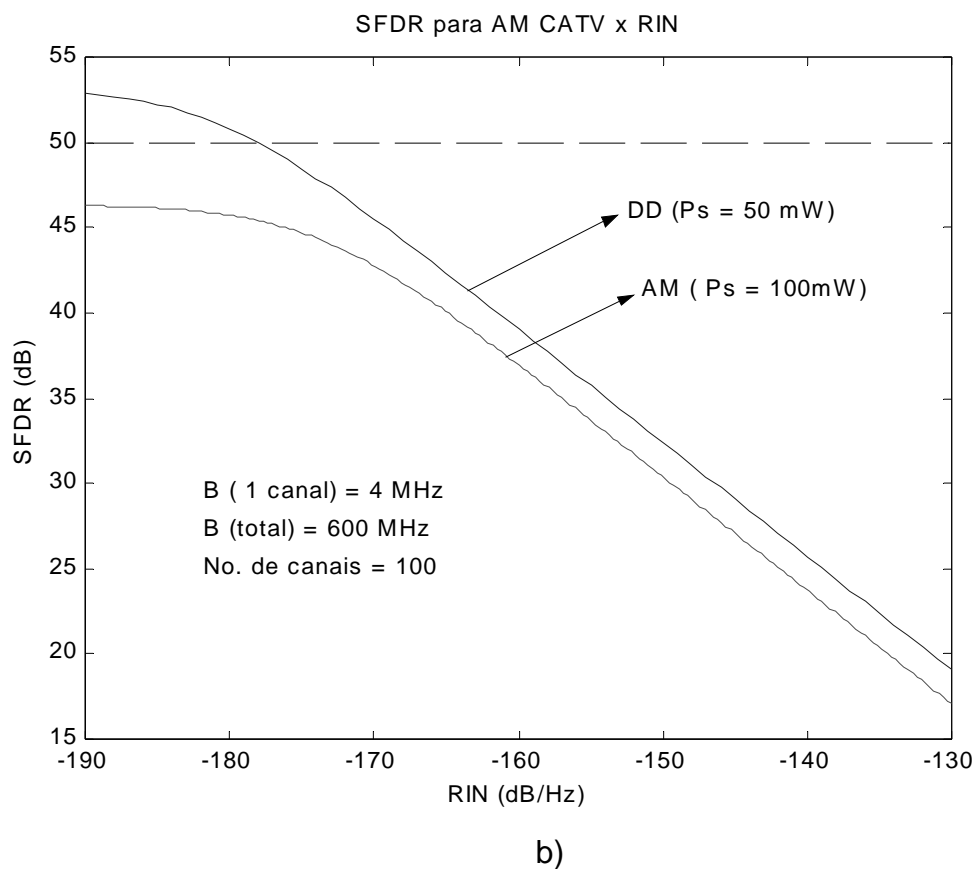
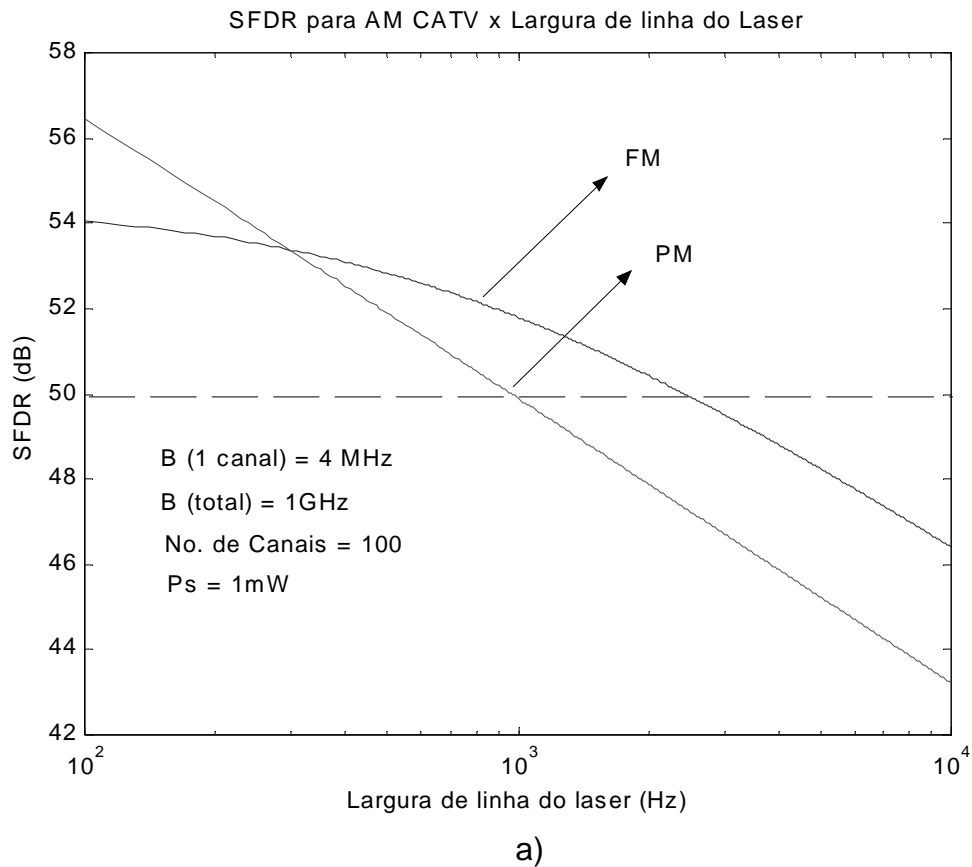
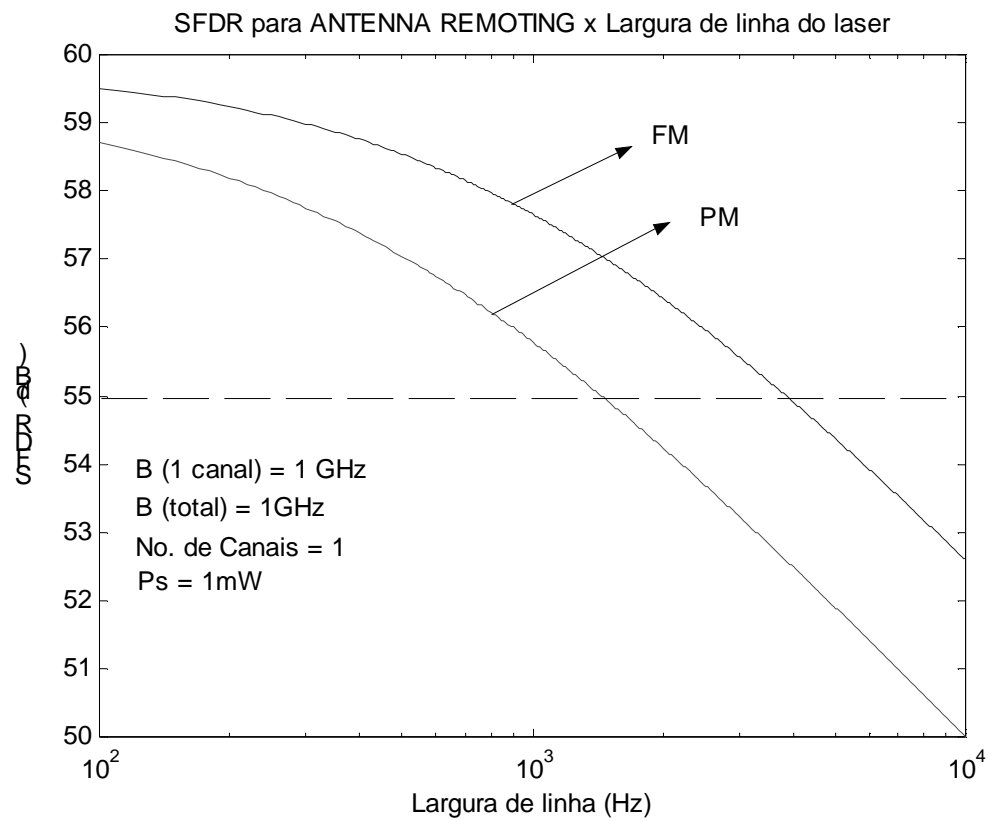
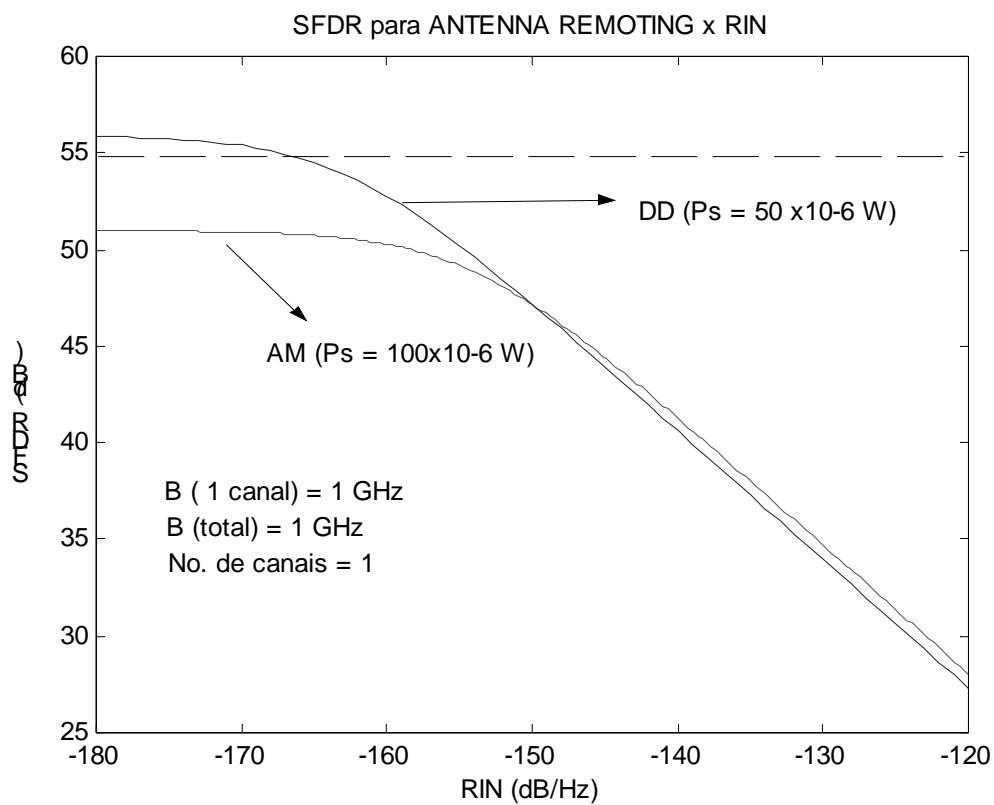


Fig. 5.10. SFDR para o sistema AM CATV : (a) versus.largura de linha, para FM e PM (b) versus RIN, para DD e AM. Os requisitos mínimos do sistema são marcados pela linha pontilhada.



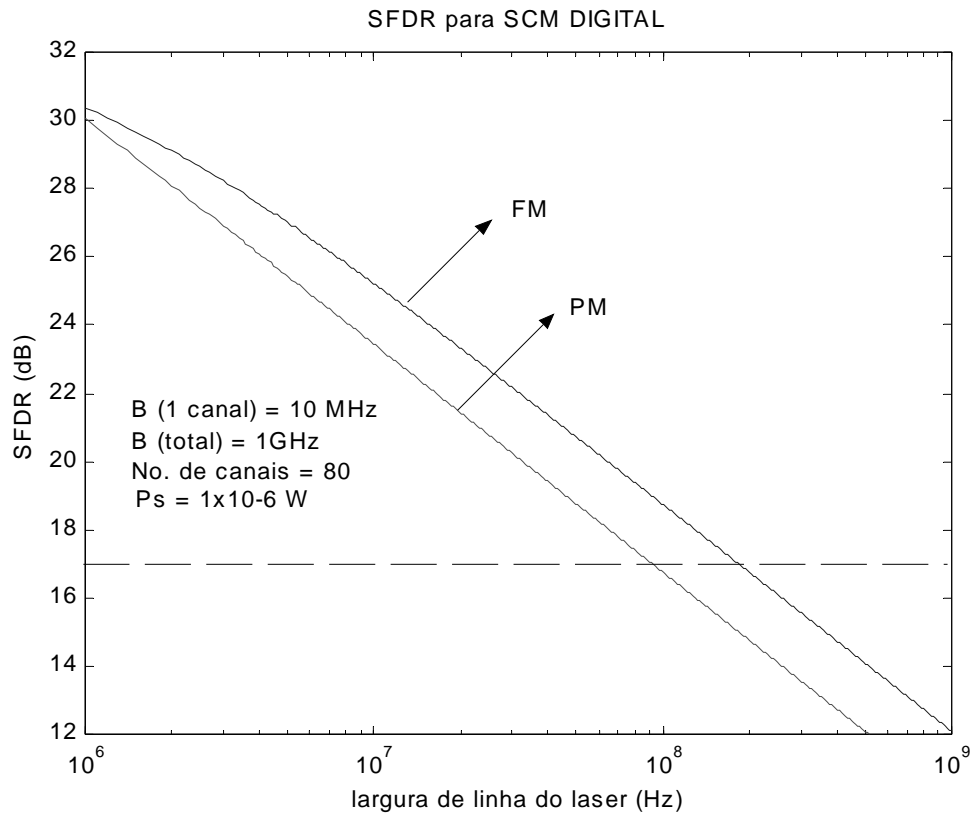
a)



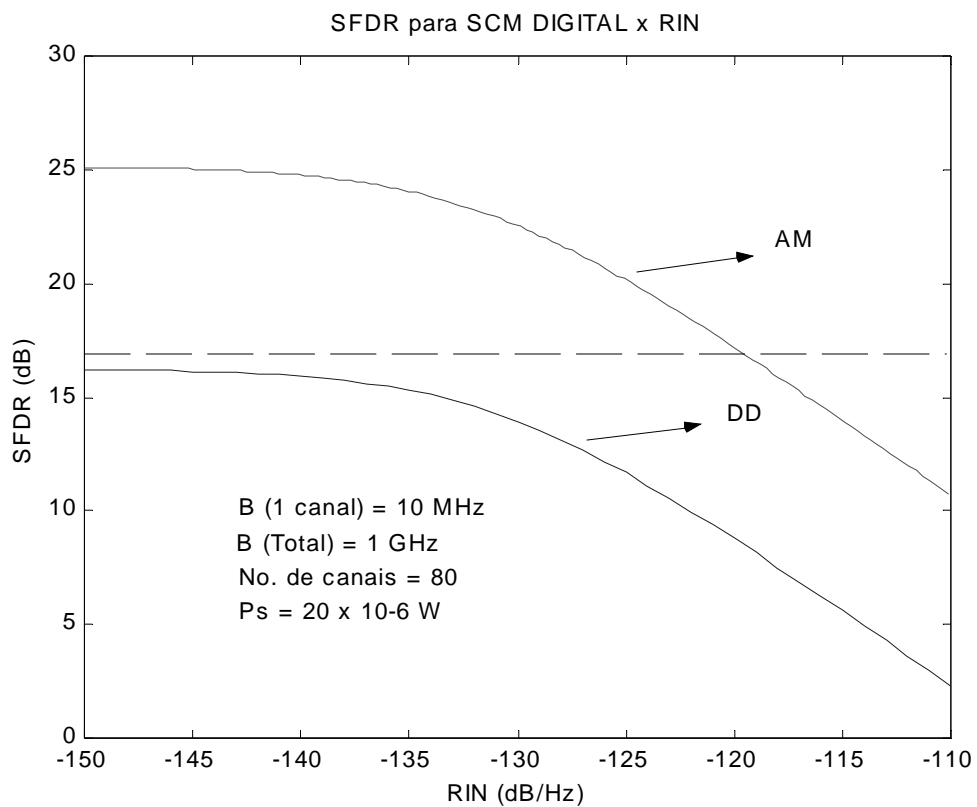
b)

Fig. 5.11. SFDR para Antenna Remoting: (a) versus largura de linha, para FM e PM (b) versus RIN, para DD e AM.



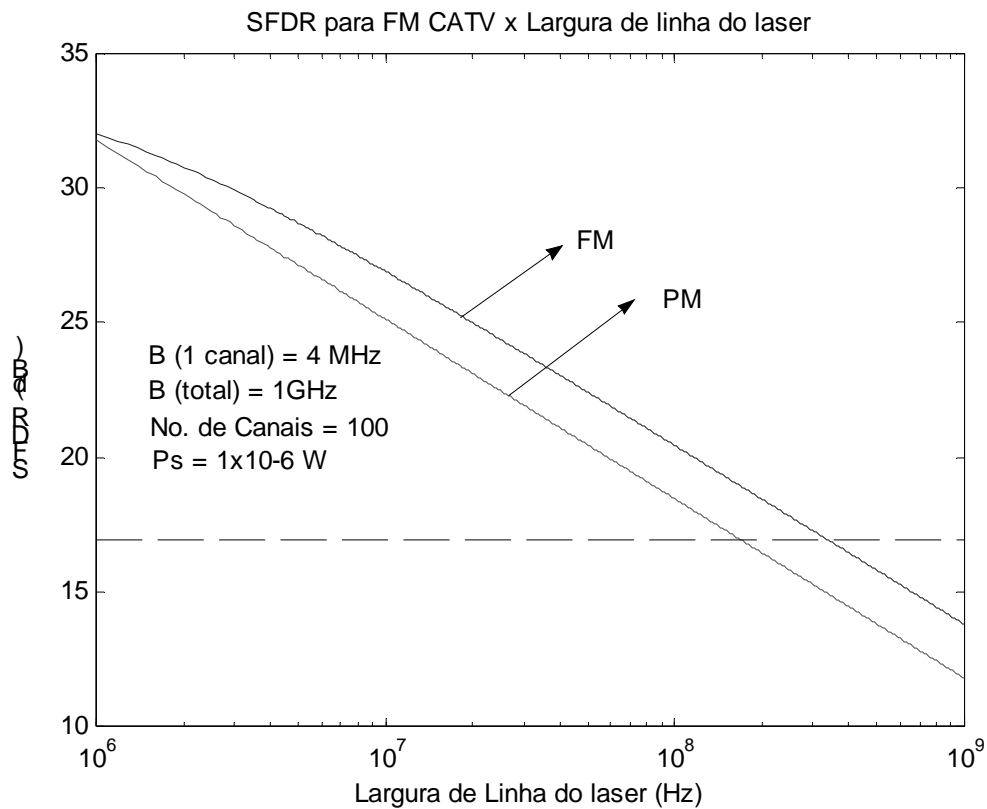


a)

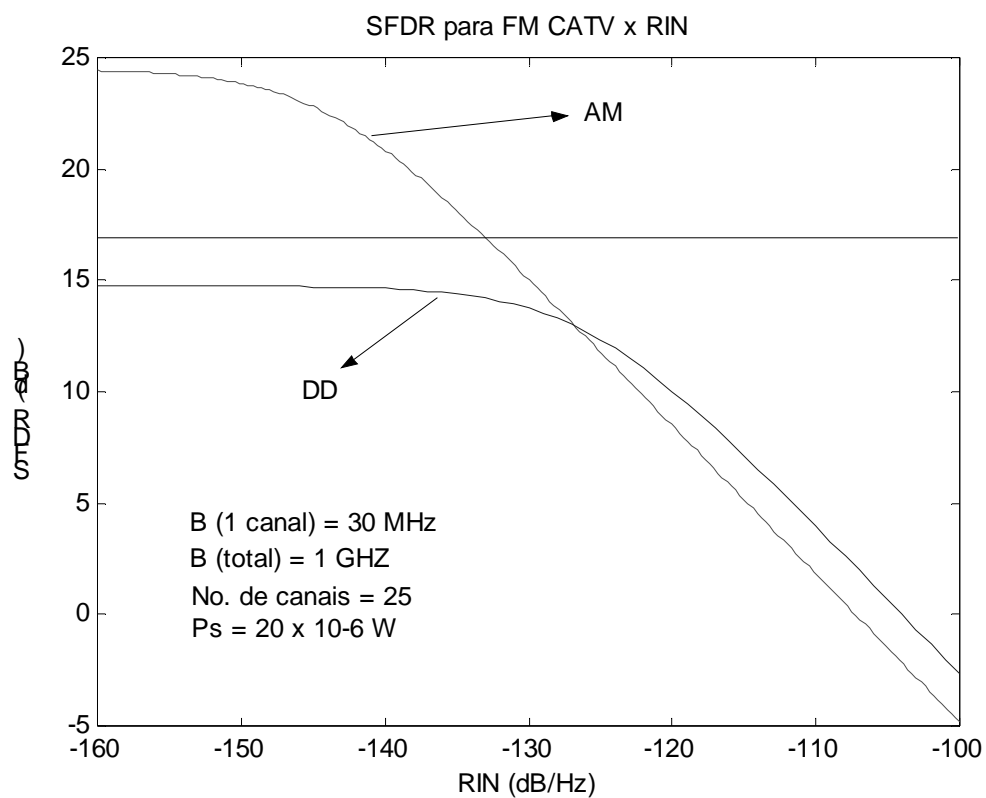


b)

Fig. 5.12 - SFDR para o sistema SCM Digital : (a) versus largura de linha, para FM e PM (b) versus RIN, para DD e AM.



a)



b)

Fig. 5.13. SFDR para o sistema FM CATV : (a) versus largura de linha, para FM e PM (b) versus RIN, para DD e AM.

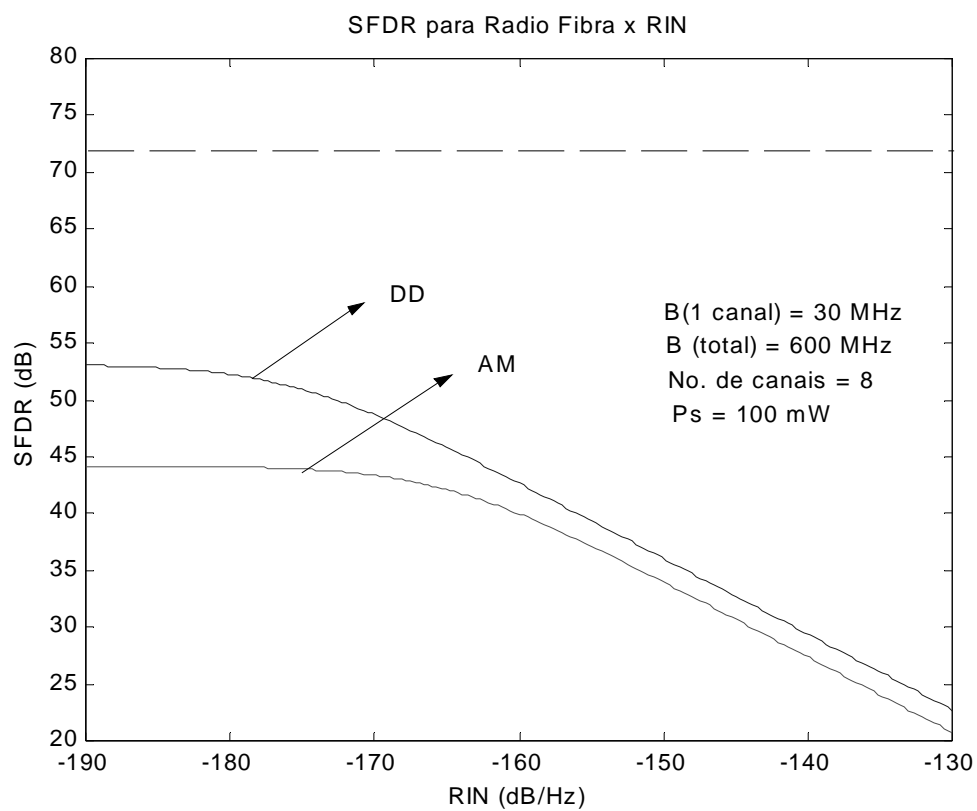
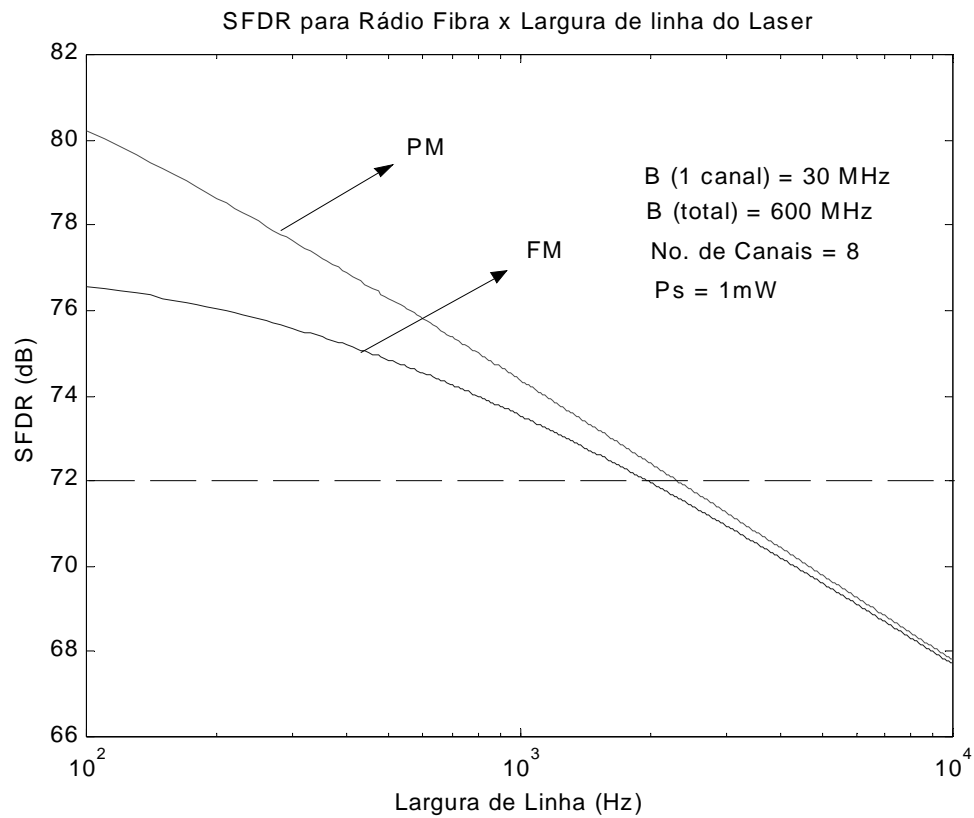
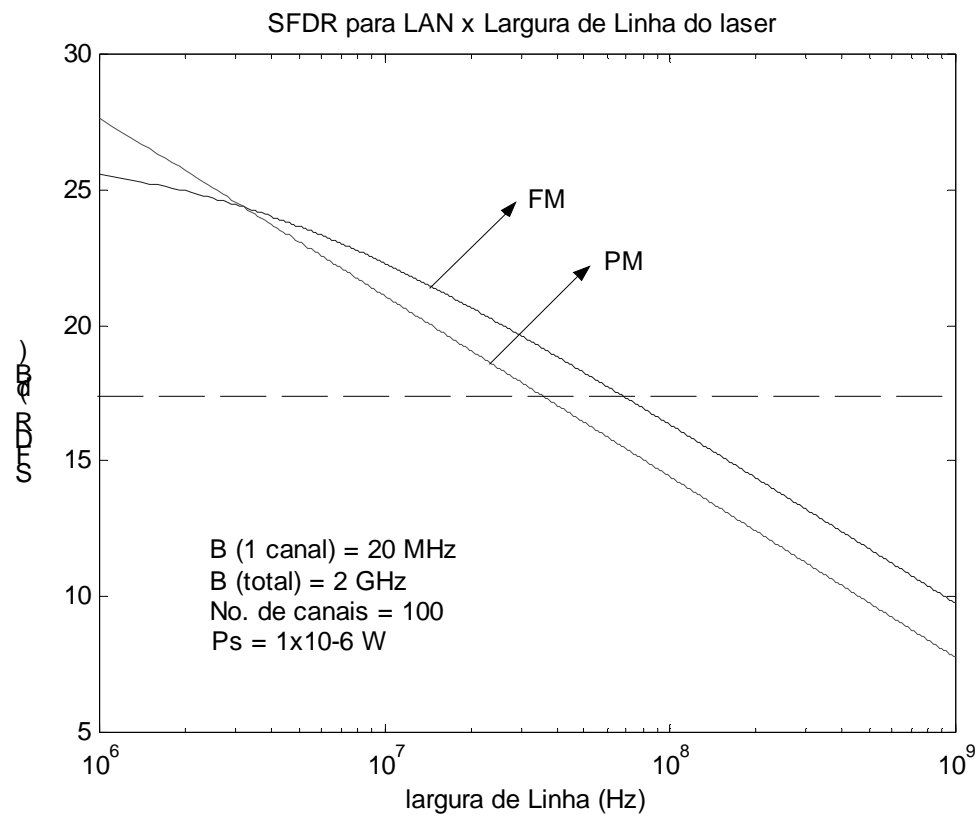
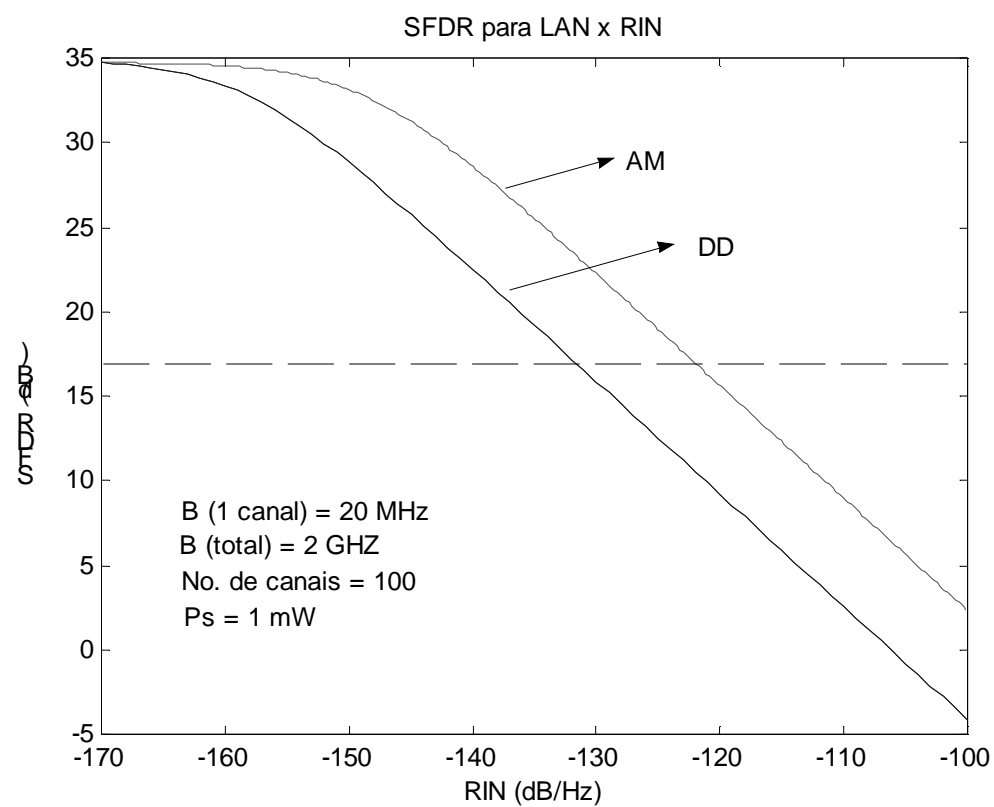


Fig. 5.14. SFDR para o sistema Rádio Fibra : (a) versus largura de linha, para FM e PM (b) versus RIN, para DD e AM.

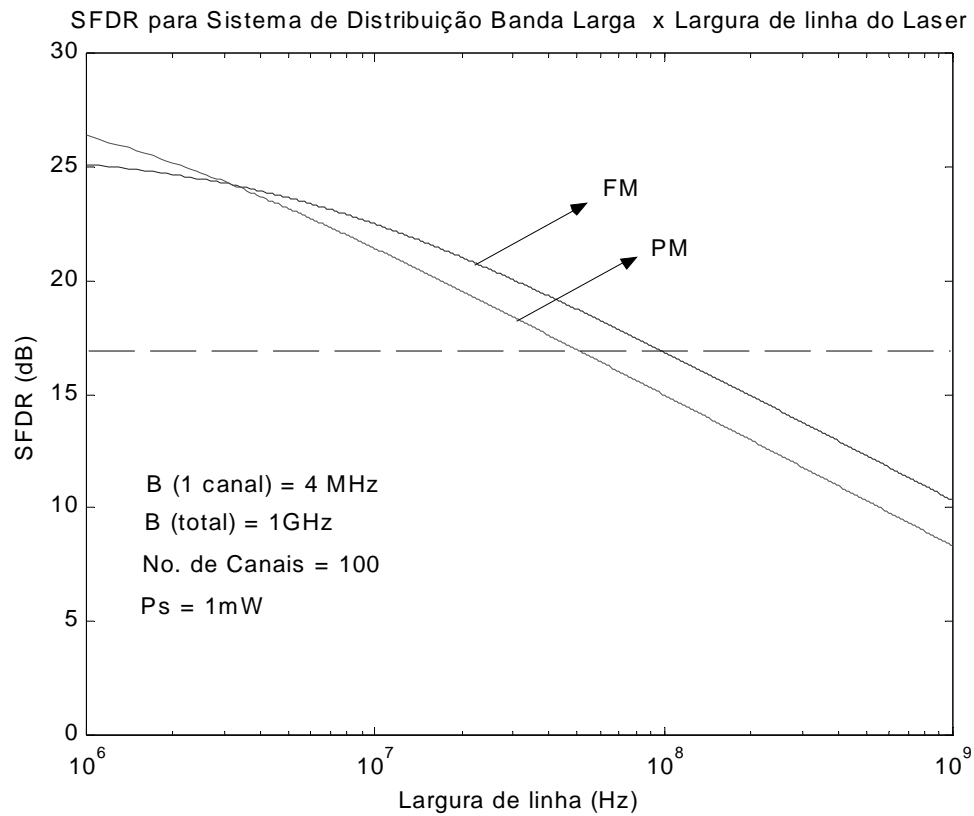


a)

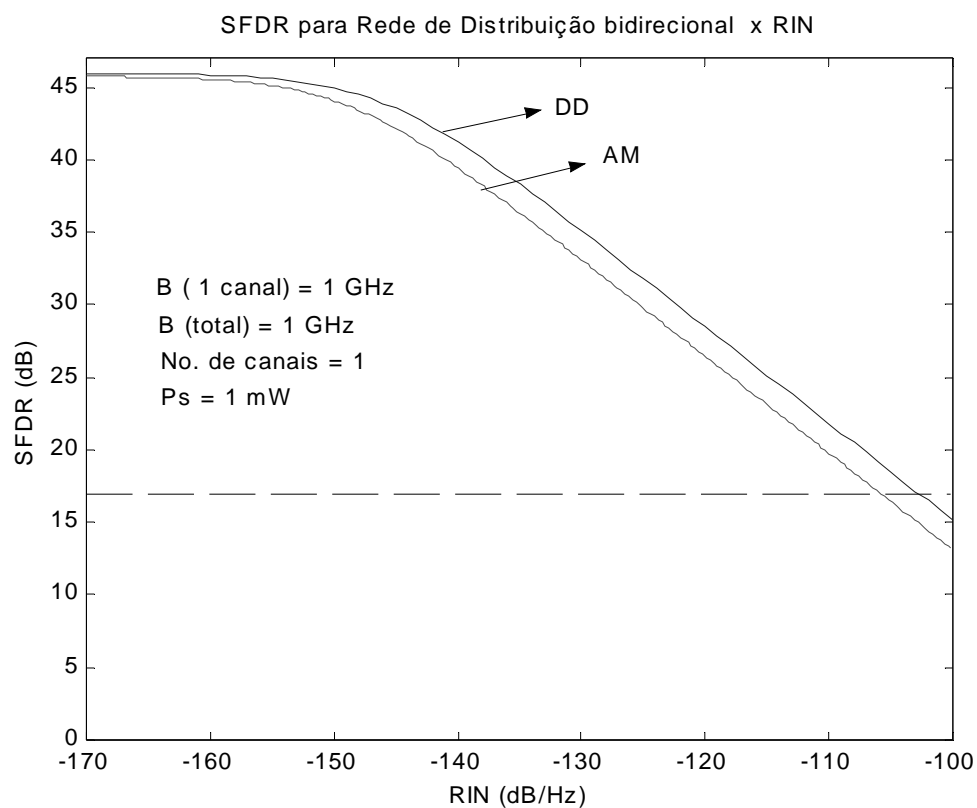


b)

Fig. 5.15 - SFDR para LAN: a) versus largura de linha, para FM e PM b) versus RIN, para DD e AM.



a)



b)

Fig. 5.16 - SFDR para o sistema de Distribuição banda larga : a) versus.largura de linha, para FM e PM b) versus RIN, para DD e AM.

Em um sistema SCM digital, uma SFDR de 17 dB para uma largura de banda de 10 MHz é requerida [12]. A uma  $P_s$  de  $1\mu\text{W}$ , é preciso uma largura de linha de  $<80$  MHz no sistema PM e  $<200$  MHz no sistema FM, conforme a Figura 5.12 (a). Esta condição também pode ser alcançada em um sistema DD com uma  $P_s$  de  $50\mu\text{W}$ . O sistema AM coerente pode satisfazer a SFDR necessária a uma  $P_s$  de  $20\mu\text{W}$ . Para estas pequenas potências ópticas, altos valores de RIN são necessários, a fim de que este domine o ruído térmico, conforme mostra a figura 5.12 (b).

Os sistemas FM CATV necessitam de uma SFDR de 17dB para alcançar uma transmissão de vídeo aceitável para uma subportadora FM com largura de banda de 30MHz [2]. Isto pode ser alcançado em um sistema PM ou FM para  $P_s = 1\mu\text{W}$  com larguras de linha de  $< 150$  e  $< 350$  MHz, respectivamente (Figura 5.13 (a)). Nos sistemas AM e DD, as menores  $P_s$  para a qual as necessidades de faixa dinâmica podem ser alcançadas são 0,5 e 25  $\mu\text{W}$ , respectivamente. As necessidades de potência para FM CATV são menores que para o SCM digital porque um número menor de canais pode ser transmitido em uma banda de 1 GHz, levando a uma menor distorção por intermodulação.

Para um sistema rádio-fibra, uma faixa dinâmica de 72 dB/Hz é necessária em uma largura de banda total de 600 KHz [5]. Com esta alta faixa dinâmica, somente os enlaces FM e PM conseguirão preencher os requisitos do sistema, com largura de linha de 5kHz e 5,5 kHz respectivamente, conforme a Figura 5.14 (a). Os enlaces DD e AM, mesmo para uma potência de 100 mW, ficam distantes dos requisitos necessários.

Com uma largura de banda total de 2 GHz e uma necessidade de faixa dinâmica de 17 dB [2], os sistemas de LAN mostrados no Capítulo 2 podem ser implementados com enlaces FM e PM, para lasers com largura de linha de 70 MHz e 38 MHz respectivamente, e uma potência de  $1\mu\text{W}$ . Para enlaces DD e AM, a faixa dinâmica necessária pode ser alcançada a uma potência de 1 mW, conforme a Figura 5.15 (b).

Em um sistema de distribuição Banda larga, com uma largura de banda total de 2,5 GHz, uma faixa dinâmica de 17 dB é necessária [2]. Para tais requisitos, os enlaces FM e PM são uma opção com larguras de linha dos

lasers de 100 MHz para FM e 50 MHz para o enlace PM, como mostra a figura 5.16 (a). Os enlaces DD e AM também atendem às especificações, e o seu desempenho é mostrado na Figura 5.16 (b).

Pela análise das aplicações anteriores, percebe-se que os enlaces FM e PM têm melhor desempenho que os enlaces AM e DD quando é necessária uma alta faixa dinâmica ( $\geq 50$  dB) e uma potência óptica normalizada transmitida em torno de 1mw, como nos sistemas Rádio-Fibra e Antenna Remoting, usando lasers de largura de linha estreita (Nd:Yag). Para sistemas com baixa potência normalizada transmitida ( $P_s \leq 1 \mu W$ ) podem ser usados lasers com grande largura de linha (DFB), como é o caso dos sistemas FM CATV, SCM Digital, LAN e Distribuição banda Larga. O enlace AM tem o seu melhor desempenho em baixas potências ( $P_s \leq 20 \mu W$ ) com fontes de alta largura de linha, como é o caso para os sistemas FM CATV e SCM Digital. Para altas potências normalizadas transmitidas, onde podem operar no limite do ruído balístico, os sistemas de detecção direta mostram os seus melhores valores de faixa dinâmica, como é o caso do sistema AM CATV.