

Capítulo 7 – Sistemas de Comunicações Analógicas

7.1 Receptores para Modulação CW

Receptores Super-heteródinos:

Além da demodulação, um receptor de radiodifusão típico deve desempenhar outras três operações:

- Sintonia da frequência de portadora, para selecionar o(a) sinal (emissora) desejado(a);
- Filtragem, para separar tal sinal (emissora) de outros(as) recebidos(as) junto com o(a) mesmo(a);
- Amplificação, para compensar as perdas de transmissão.

A amplificação tem por objetivo trazer a intensidade do sinal a um nível suficientemente alto para que possa ser processado pelo circuito eletrônico de demodulação: por exemplo, se o demodulador é baseado em detector de envoltória a diodo, o sinal de entrada deve vencer a queda de tensão direta dos diodo.

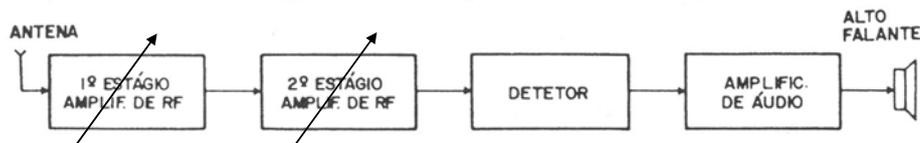
Teoricamente, todas essas exigências poderiam ser satisfeitas com um amplificador passa banda de alto ganho e sintonizável.

Na prática, problemas com largura de banda fracionária (razão entre largura de banda e frequência central fora da faixa entre 0.01 e 0.1) e estabilidade tornam tal amplificador caro e de difícil construção

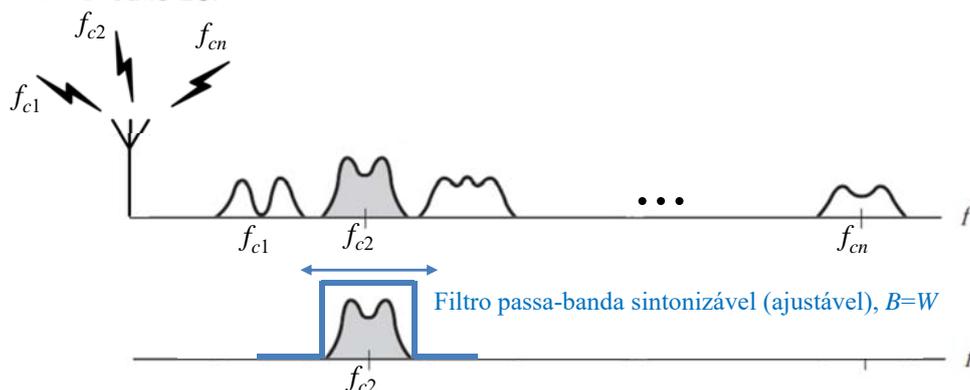
Usando-se componentes analógicos, é difícil e anti-econômico implementar um filtro seletivo (de Q elevado) para rejeitar sinais de canais adjacentes e que também seja sintonizável (que possua frequência central variável, constituindo uma “janela” móvel).

RECEPTOR DE RÁDIO-FREQÜÊNCIA SINTONIZADA*

O receptor de RFS ou regenerativo é apresentado no diagrama de blocos:



É importante observar que os dois estágios de amplificação de rádio-freqüência são estágios sintonizados em uma freqüência definida, correspondente à estação que se deseja receber. Desta forma, é necessário o uso de um filtro passa-faixas em cada um dos amplificadores de RF, sendo esse filtro passa-faixas composto de um circuito LC.



* Gomes, Alcides Tadeu, Telecomunicações: Transmissão e Recepção AM/FM, ed. Érica, 2000.

Sabe-se que o índice de mérito de um filtro LC não pode ser maior que o índice de mérito de cada um dos seus componentes e que é normalmente o indutor quem limita o fator de qualidade (Q) do filtro LC.

Para um indutor:

$$Q = \frac{X_L}{R_s} = \frac{2\pi fL}{R_s} = \text{constante}$$

sendo R_s a resistência série do indutor.

Afirma-se que num filtro de RF o fator de qualidade Q permanece praticamente constante em toda a faixa de recepção. Isto pode parecer estranho, pois se a frequência aumentar, X_L também aumentará e, com R_s constante, Q ficará cada vez maior.

Contudo, existe uma falha neste raciocínio, pois na faixa de RF a frequência é suficientemente alta para que comece a surgir o "efeito pelicular" que consiste na passagem da corrente elétrica pela periferia do condutor, ficando sua porção central sem função alguma. Isso diminui a secção transversal útil do condutor e assim sua resistência própria (R_s) aumentará com o aumento da frequência.

A partir dessa explanação, pode-se citar o primeiro (e talvez o fundamental) problema do receptor de RFS, que é o fato da seletividade variar ao longo da faixa.

A gama de frequências reservadas para rádio-difusão comercial AM-DSB é de 535 KHz a 1650 KHz e a faixa reservada para cada estação é de 10 KHz. Se for observado que a relação entre as frequências de cada extremo da faixa é:

$$\frac{1.650}{535} \approx 3,1 \text{ vezes}$$

pode determinar um "Q" para que, no extremo inferior da faixa, a banda passante seja de 10 KHz. Como a relação:

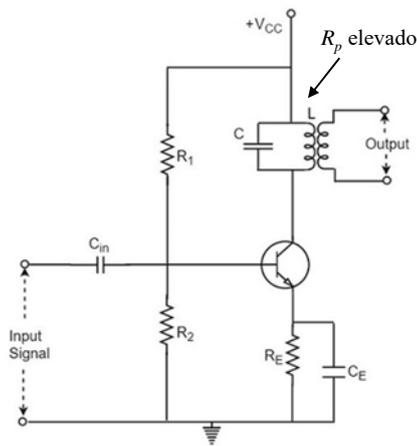
$$B = \frac{f_0}{Q}$$

Para $f_0=535$ kHz $Q = \frac{f_0}{10 \text{ kHz}} = \text{cte.}$ 

Para $f'_0=1650$ kHz $B' = \frac{f'_0}{Q} = \frac{3,1f_0}{f_0/10 \text{ kHz}} = 31 \text{ kHz}$

Portanto, ao variar a frequência central do filtro móvel, de 535 para 1650 kHz, sua largura de banda aumenta para 31 kHz, podendo deixar passar até 3 emissoras.

O segundo problema do receptor regenerativo reside no fato do ganho dos amplificadores aumentar com o aumento da frequência, pois como o filtro LC é a carga do amplificador transistorizado, na ressonância sua impedância será igual a R_p e já que R_p aumenta juntamente com a frequência, o ganho do estágio amplificador tende a aumentar também.



Resistência do indutor: aumenta com f

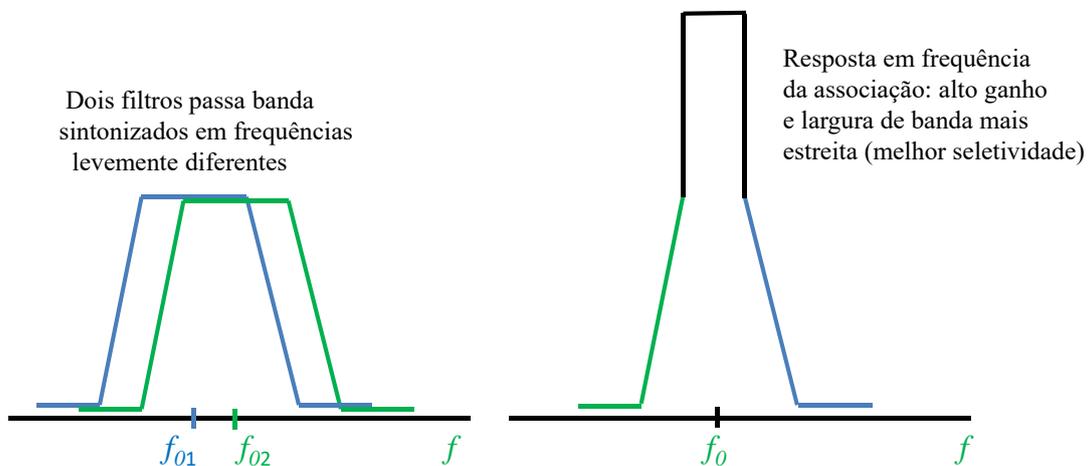
Ganho de tensão:

$$A_v = -\frac{R_p}{R_E}$$

Se: $f \uparrow$ então $R_p \uparrow$ logo $A_v \uparrow$

Esse alto ganho pode gerar oscilações indesejáveis em altas frequências, o que prejudicaria sensivelmente o desempenho do receptor.

Um terceiro problema reside no fato de se usarem dois (ou às vezes, até mais) estágios sintonizados de RF, pois utilizando-se apenas um estágio, seu ganho e sua seletividade não seriam suficientes e ao se usar mais de um estágio torna-se bastante difícil fazer com que os vários filtros operem exatamente na mesma frequência ao longo de toda a faixa de recepção, mantendo a viabilidade prática e econômica do projeto do receptor.



Armstrong (1918) propôs o receptor super-heteródino (*superhet*) a fim de superar esses problemas.

O princípio do *superhet* emprega dois amplificadores distintos (RF, IF) e seções de filtragem antes da demodulação:

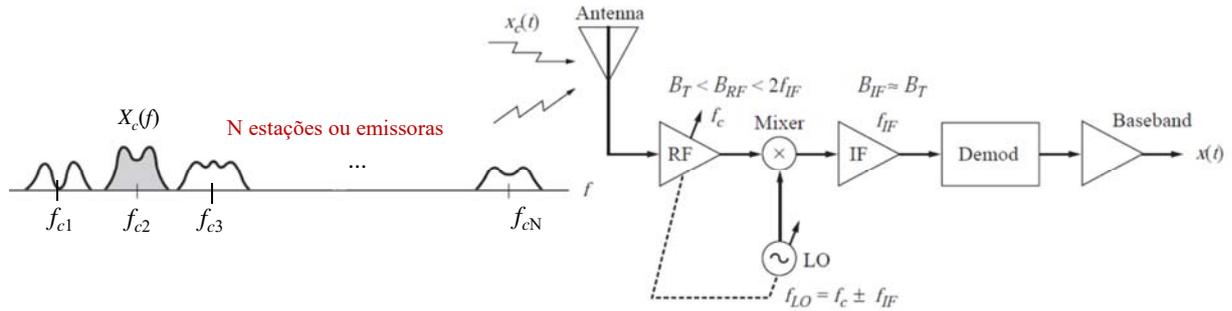


Figure 7.1-1 Superheterodyne receiver.

O sinal captado $x_c(t)$, primeiramente é selecionado e amplificado por uma seção de rádio-frequência (RF) sintonizada na frequência de portadora desejada, f_c (por exemplo, f_{c2} , como mostrado na figura).

O amplificador de RF possui uma largura de banda relativamente larga, B_{RF} (tal que $B_T < B_{RF} < 2f_{IF}$), que permite a passagem parcial de alguns sinais de canais adjacentes, em conjunto com $x_c(t)$. *ver explicação adiante*

A seguir, um conversor de frequência formado por um *mixer* e um *oscilador local LO* executam *down-conversion* da saída de RF para uma *frequência intermediária (FI)*, em $f_{FI} < f_c$. *ver explicação adiante*

A frequência ajustável do oscilador local LO, f_{LO} , rastreia a sintonia de RF (f_c) tal que*:

$$f_{LO} = f_c + f_{IF} \quad \text{or} \quad f_{LO} = f_c - f_{IF} \quad (1)$$

dessas duas, qual é a melhor opção?

e portanto,

$$|f_c - f_{LO}| = f_{IF} \quad (2)$$

*Obs: $\cos \omega_{LO} t \cos \omega_c t = \frac{1}{2} [\cos(\omega_{LO} + \omega_c) t + \cos(\omega_{LO} - \omega_c) t] = \cos \omega_c t \cos \omega_{LO} t = \frac{1}{2} [\cos(\omega_c + \omega_{LO}) t + \cos(\omega_c - \omega_{LO}) t]$
multiplicador *BPF* *IF* *BPF* *IF*

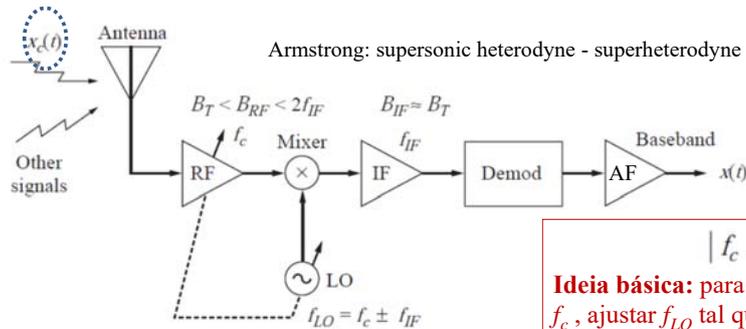


Figure 7.1-1 Superheterodyne receiver.

$|f_c - f_{LO}| = f_{IF}$

Ideia básica: para uma dada emissora centrada em f_c , ajustar f_{LO} tal que esta condição seja satisfeita, e assim, só tal emissora atravessará o filtro seletivo IF.

Uma *seção de FI*, com largura de banda $B_{IF} \approx B_T$, remove os sinais dos canais adjacentes permitindo somente a passagem de $x_c(t)$.

Esta *seção* é um amplificador (em geral, com dois ou mais estágios) passa banda com frequência central fixa, chamada de “faixa de FI” (*IF strip*), que proporciona a maior parte do ganho do *superhet*.

Finalmente, a saída de FI se dirige ao demodulador (Demod), para a recuperação da mensagem e amplificação em banda base (áudio frequência, AF).

Table 7.1-1 Parameters of AM and FM radios

	AM	FM
Carrier frequency	540–1700 kHz	88.1–107.9 MHz
Carrier spacing	10 kHz	200 kHz
Intermediate frequency	455 kHz	10.7 MHz
IF bandwidth	6–10 kHz	200–250 kHz
Audio bandwidth	3–5 kHz	15 kHz

* Sistemas de radiodifusão Norte Americanos.

Explicação detalhada

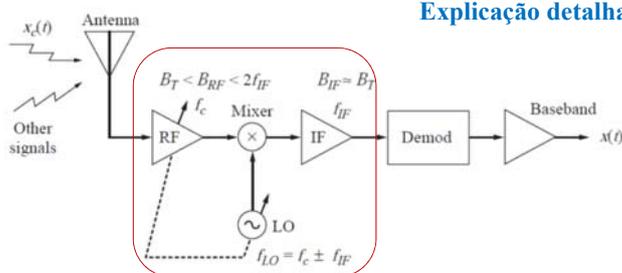


Figure 7.1-1 Superheterodyne receiver.

Front end = seção do receptor usada para selecionar a estação desejada: estágio de alto ganho e baixo ruído (RF) + misturador (Mixer) + oscilador local (LO).

O espectro da Fig. 7.1-2a ajuda esclarecer a ação do receptor *superhet* (no caso de sinal modulado em AM/DSB):

Assume-se que $f_{LO} > f_c$: (por que?)

Este espectro de RF inclui o sinal desejado (em torno de f_c), mais os sinais adjacentes em ambos os lados.

Também contém o **sinal na frequência imagem** (f'_c).

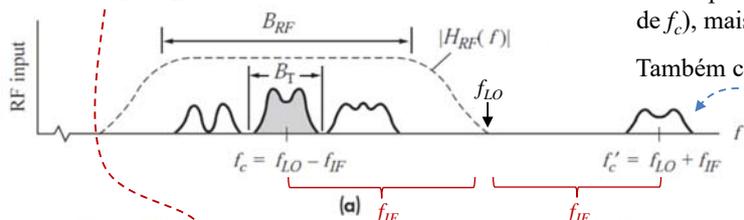


Figure 7.1-2 Spectrums in a superheterodyne receiver. (a) At the antenna

Assim, toma-se $f_{LO} = f_c + f_{IF}$, tal que:

$$f_c = f_{LO} - f_{IF}$$

A frequência imagem está em:

$$f'_c = f_c + 2f_{IF} = f_{LO} + f_{IF} \quad (3)$$

As duas frequências aceitáveis, f_c e f'_c , são conseqüências de (2):

$$|f_c - f_{LO}| = f_{IF} \quad (2)$$

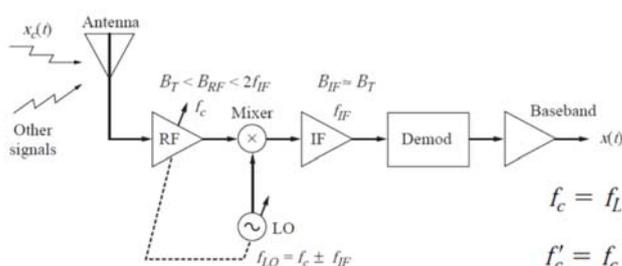


Figure 7.1-1 Superheterodyne receiver.

$$\cos \omega'_c t \cos \omega_{LO} t = \frac{1}{2} [\cos(\omega'_c + \omega_{LO})t + \cos(\omega'_c - \omega_{LO})t]$$

mixer = multiplicador + BPF

$$f_c = f_{LO} - f_{IF}$$

$$f'_c = f_c + 2f_{IF} = f_{LO} + f_{IF} \quad (3)$$

A principal tarefa da seção de RF é passar pelo menos ($f_c \pm B_T/2$), enquanto rejeita o sinal na frequência imagem.

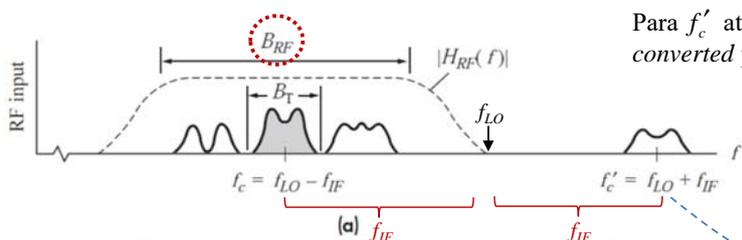


Figure 7.1-2 Spectrums in a superheterodyne receiver. (a) At the antenna

Para f'_c atravessar o *mixer*, ela deveria ser *down converted* para:

$$-f_{LO} = (f_{LO} + f_{IF}) - f_{LO} = f_{IF}$$

Assim, o sinal na frequência imagem deveria produzir um efeito similar à interferência de co-canal.

Ver capítulo 5.

Portanto, torna-se necessária uma resposta de RF, $|H_{RF}(f)|$, como a linha tracejada mostrada na Fig. 7.1-2, com

$$B_T < B_{RF} < 2f_{IF} \quad (4)$$

Note-se que f_{LO} deve estar fora da banda do filtro *front end*, passa banda e sintonizável, a fim de se evitar efeitos de bloqueio.

Quanto maior for FI maior será a frequência imagem, diminuindo assim a necessidade de um BPF com banda estreita para o *front end* (de fato, o filtro RF pode acomodar até três estações).

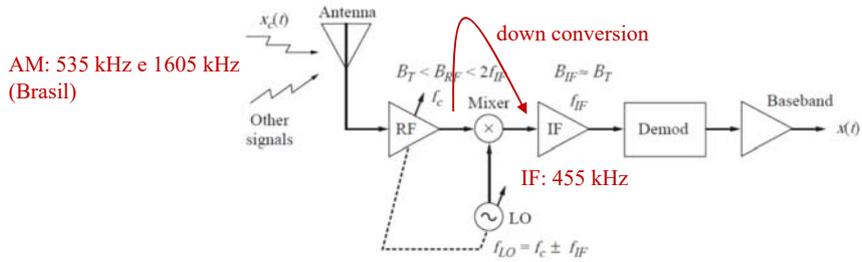
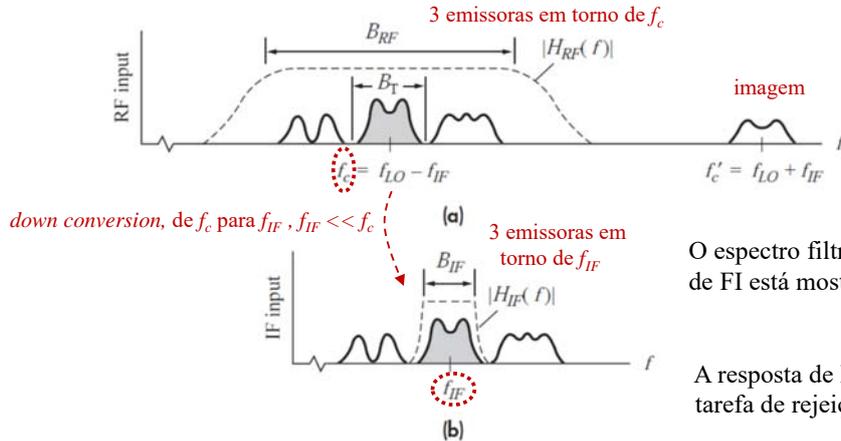


Figure 7.1-1 Superheterodyne receiver.

Ressalta-se que, enquanto o filtro IF-BPF **seletivo** seja necessário a fim de se rejeitar os sinais de canal adjacente, ele não ajuda a rejeitar **imagens**. ver adinate



O espectro filtrado e *down-converted* para a entrada de FI está mostrada na Fig. 7.1-2b.

A resposta de FI, $|H_{IF}(f)|$, com $B_{IF} \approx B_T$, completa a tarefa de rejeição de **canal adjacente**.

Figure 7.1-2 Spectrums in a superheterodyne receiver. (a) At the antenna, (b) in the IF section.

Exemplo: Rádio-difusão em AM ($535 \text{ kHz} < f_c < 1605 \text{ kHz}$ e $f_{IF} = 455 \text{ kHz}$, Anatel - Brasil)

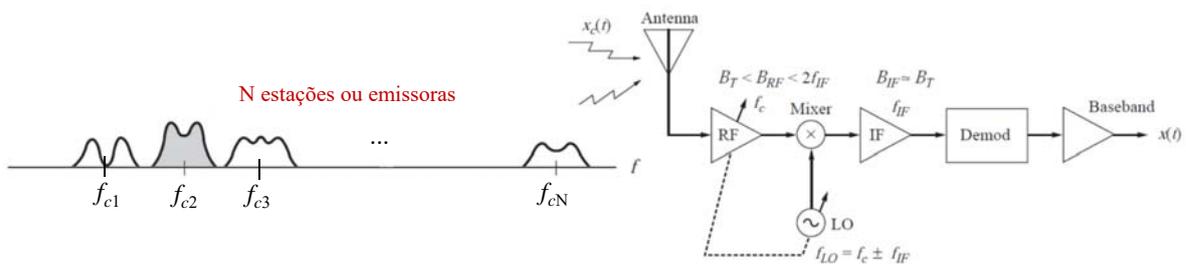


Figure 7.1-1 Superheterodyne receiver.

Pergunta: como sintonizar uma dada emissora cuja portadora é f_c ???

Resposta: a frequência do oscilador local deve ser ajustada convenientemente.

Exemplo: Rádio-difusão em AM ($535 \text{ kHz} < f_c < 1605 \text{ kHz}$ e $f_{IF} = 455 \text{ kHz}$, Anatel - Brasil)

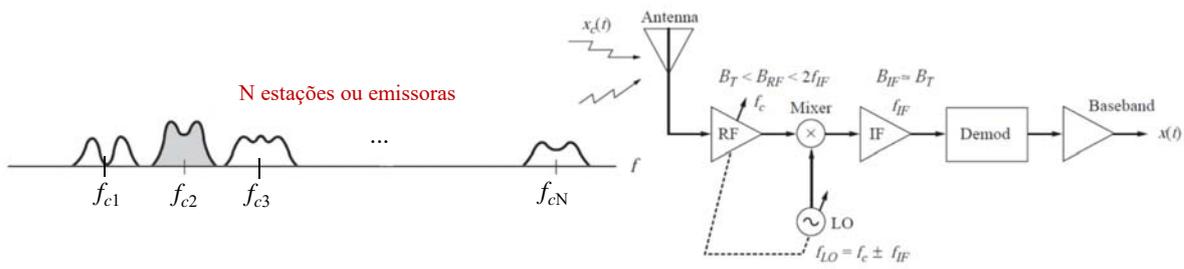
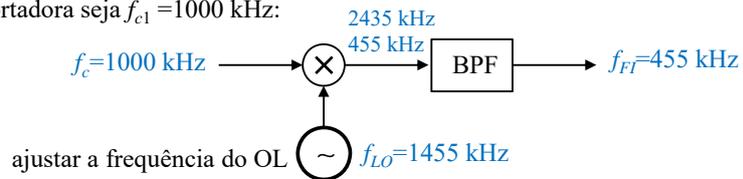
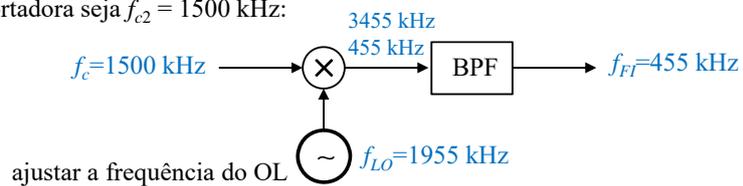


Figure 7.1-1 Superheterodyne receiver.

- Para sintonizar a estação cuja portadora seja $f_{c1} = 1000 \text{ kHz}$:



- Para sintonizar a estação cuja portadora seja $f_{c2} = 1500 \text{ kHz}$:



A estrutura do *superhet* resulta em diversos benefícios práticos:

- A sintonia acontece totalmente no *front end*, e assim, o restante do circuito, incluindo-se o demodulador, não necessita de ajustes para variar f_c (processo de *down conversion*).
- A separação entre f_c e f_{FI} elimina potencial instabilidade devido a realimentação parasita da saída amplificada para as entradas do receptor.
- A maior parte do ganho e seletividade está concentrada na faixa de FI (*IF strip*), em torno de frequência fixa (f_{IF}).
- O esforço de projeto (amplificadores com grande linearidade e banda estreita) se concentra em proporcionar seletividade ao estágio de FI, cuja frequência não é tão alta como a da portadora; além disso, trata-se de um filtro fixo, ao contrário do filtro de RF, que é móvel.

Desde que f_{FI} é um parâmetro interno de projeto, ele pode ser escolhido para se obter uma largura de banda fracionária B_{FI} / f_{FI} razoável para que a implementação do filtro seja fácil, eficiente e barata.

Recordação (seção 4.1): A escolha da frequência intermediária (FI) dos sistemas de comunicação também costuma obedecer a regra prática $B \approx 0.02 f_c$:

- AM (535 a 1605 kHz): $B = 10 \text{ kHz} \rightarrow f_{FI} = 455 \text{ kHz}$ tal que $B/f_{FI} \approx 0.02$.
- FM (88.1 a 107.9 MHz): $B = 200 \text{ kHz} \rightarrow f_{FI} = 10.7 \text{ MHz}$ tal que $B/f_{FI} \approx 0.02$

Levando-se em consideração estes benefícios, torna-se possível construir *superhets* com ganho extremamente elevado, da ordem de 75 dB ou mais, apenas na faixa de FI (*IF strip*).

Também é possível se utilizar filtros mecânicos, cerâmicos ou de SAW (*surface acoustic wave*) de alto-Q, atingindo-se uma redução substancial na interferência de canal adjacente.

Adicionalmente, quando o receptor precisa cobrir uma grande faixa de frequências, a escolha de $f_{LO} = f_c + f_{IF}$ (usando +) pode resultar numa razão/taxa de sintonia do oscilador local (OL) menor e mais fácil de ser realizável.

Exemplo: Em rádio-difusão de AM ($540 \text{ kHz} < f_c < 1700 \text{ kHz}$ e $f_{IF} = 455 \text{ kHz}$)

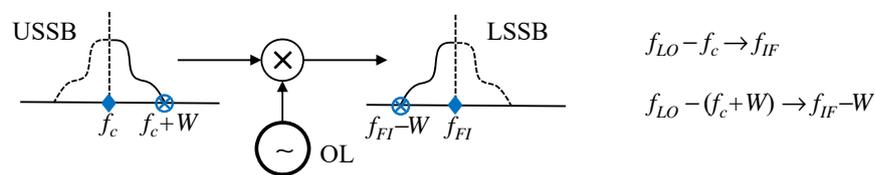
Aplicando-se $f_{LO} = f_c + f_{IF}$ resulta na faixa: $995 \text{ kHz} < f_{LO} < 2155 \text{ kHz}$.
Isto significa uma faixa de sintonia do OL igual a **2:1**.

Por outro lado, se fosse escolhido $f_{LO} = f_c - f_{IF}$, então, para o mesmo FI e mesma faixa de frequência de entrada, ocorreria: $85 \text{ kHz} < f_{LO} < 1245 \text{ kHz}$.

Embora se opere com frequências menores, a faixa de sintonia do OL seria igual a **13:1**.

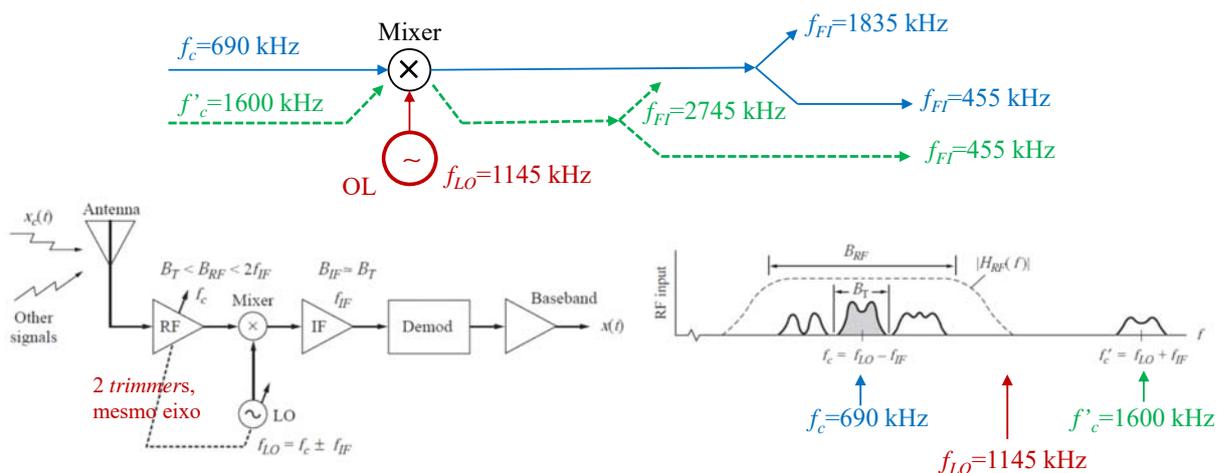
Na prática, é mais difícil construir om OL com faixa de sintonia (obviamente, com banda plana) igual a 13:1 do que 2:1. #

É interessante mencionar que, tomando-se $f_{LO} > f_c$ num *superhet* para SSB, gera-se reversão de banda lateral no sinal *down-converted*, tal que, USSB na seção de RF torna-se LSSB na seção de FI, e vice-versa.



A maior desvantagem da estrutura *superhet* é seu potencial para respostas espúrias em frequências além de f_c .

O problema mais óbvio é a resposta à **frequência imagem**.



Na figura acima, se emprega um **BPF sintonizável (RF)** para rejeitar a frequência imagem.

Em geral, empregam-se 2 capacitores variáveis (trimmer, varicap), um no OL e outro no estágio de saída do RF-BPF.

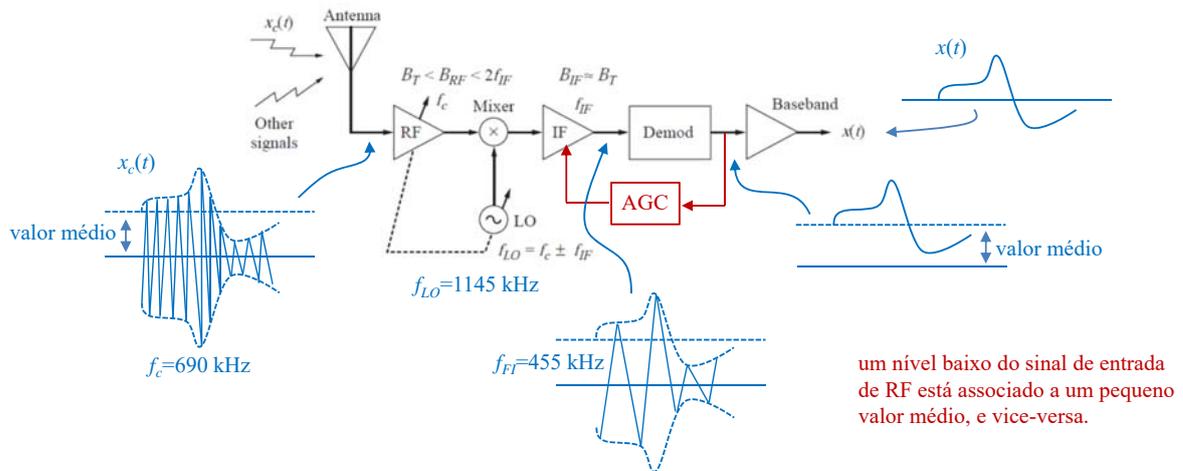
Os dois capacitores são acoplados entre si de forma que, quando um varia o outro varia simultaneamente.

Assim, ao se ajustar a frequência do OL automaticamente também se ajusta a frequência central do RF-BPF.

Embora o RF-BPF sintonizável não seja suficiente para prover seletividade (pois permite a passagem de várias estações), é útil para rejeitar as bandas de imagem.

Em geral um receptor *superhet* contém um **controle automático de ganho** (AGC) tal que o ganho do receptor seja automaticamente ajustado de acordo com o nível do sinal de entrada.

O AGC é realizado retificando-se e filtrando-se em passa baixa o sinal de áudio do receptor, e então, calculando-se seu valor médio.



O valor DC é então realimentado ao estágio de FI ou de RF, a fim de se aumentar ou diminuir o ganho dos estágio.

O AGC em rádio AM geralmente é chamado de **controle automático de volume** (AVC), e é implementado via sinal de realimentação da saída do demodulador para o estágio de FI.

Um receptor de FM geralmente possui um **controle automático de frequência** (AFC) que realimenta o OL para corrigir pequenas derivas de frequência.

Exemplo: Um receptor *superhet* com $f_{IF} = 500 \text{ kHz}$ e $3.5 \text{ MHz} < f_{LO} < 4 \text{ MHz}$ possui um *dial* de sintonia calibrado para receber sinais de 3 MHz a 3.5 MHz. Ele é ajustado para receber um sinal de 3 MHz. O receptor tem um amplificador de RF banda larga, e se descobriu que o OL tem um significativo conteúdo de terceira harmônica. Se um sinal é ouvido, especificar todas as possíveis frequências portadoras.

Solução:

Escolhendo-se $f_{LO} = 3,5 \text{ MHz} \rightarrow f_c = f_{LO} - f_{IF} = 3.5 - 0.5 = 3 \text{ MHz}$, a emissora de interesse.

Neste caso, a **frequência imagem** será: $f'_c = f_c + 2f_{IF} = 3 + 2 \times 0.5 = 4 \text{ MHz}$, que também será captada, uma vez que o amplificador de RF tem banda larga, e não execute rejeição de imagem.

Mas a **terceira harmônica** do oscilador é $f'_{LO} = 3 \times 3.5 = 10.5 \text{ MHz} \rightarrow f''_c = f'_{LO} - f_{IF} = 10.5 - 0.5 = 10 \text{ MHz}$, outra portadora possível.

A **frequência imagem** será: $f'''_c = f''_c + 2f_{IF} = 10 + 2 \times 0.5 = 11 \text{ MHz}$, que também será captada (para amplificador de RF banda larga).

Portanto, com esse receptor, ainda que o dial indique que a estação transmitindo esteja em $f_c = 3 \text{ MHz}$, pode ser que sejam estações em $f'_c = 4 \text{ MHz}$, $f''_c = 10 \text{ MHz}$ ou $f'''_c = 11 \text{ MHz}$. #