

## Laboratório de Princípios de Comunicação

Aulas Remotas - 2020.1

## Experimento 03 – Modulação AM – Parte 2

Data: 14/09/2020

**Pré-requisitos**

1. Domínio dos conceitos de ortogonalidade, translação de frequência usando *mixers* e filtragem
2. Estudo da modelagem matemática de sinais AM no domínio da frequência

**Instruções gerais**

- Organize os arquivos em um diretório específico para o laboratório em seu computador. Em caso de necessidade, os arquivos serão usados como evidência da participação em sala. Use nomes de arquivos do GRC com o formato

Matricula\_ExpXX\_ARYY.grc → Exemplo: 12345678\_Exp01\_AR03.grc

- O relatório será enviado em formato “.pdf” usando a nomenclatura

Matricula\_ExpXX\_Rel.pdf → Exemplo: 12345678\_Exp03\_Rel.pdf

- Quando solicitado, envie um arquivo compactado com o formato “.zip” com todos os arquivos relacionados ao experimento, contendo os arquivos “.grc” e “.pdf”.

Matricula\_ExpXX.zip → Exemplo: 12345678\_Exp03.zip

- Preferencialmente (mas não obrigatoriamente) use GUI do tipo “QT”.
- **Apresente no início do relatório todos os cálculos teóricos solicitados ao longo do roteiro, e coloque as tabelas no final.**

## Atividade 01 – Modulação QAM

### Conceitos preliminares

Um sinal QAM analógico pode ser representado pela expressão

$$s(t) = A_c [x_I(t)\cos(2\pi f_c t) + x_Q(t)\sin(2\pi f_c t)], \quad (1)$$

onde  $x_I(t)$  e  $x_Q(t)$  são dois sinais independentes a serem modulados, ambos com espectro em banda-base limitado em  $B$  Hz.

Cada um dos termos dentro do colchete é um sinal AM-DSB, porém  $x_I(t)$  modula um cosseno (chamada de componente em fase) e  $x_Q(t)$  modula um seno (chamada de componente em quadratura). Como visto na Parte 1 do experimento, uma modulação AM-DSB resulta em uma portadora modulada que ocupa o dobro da banda do espectro do sinal modulante. Assim, cada um desses dois sinais DSB ocupa largura de banda  $2B$  Hz

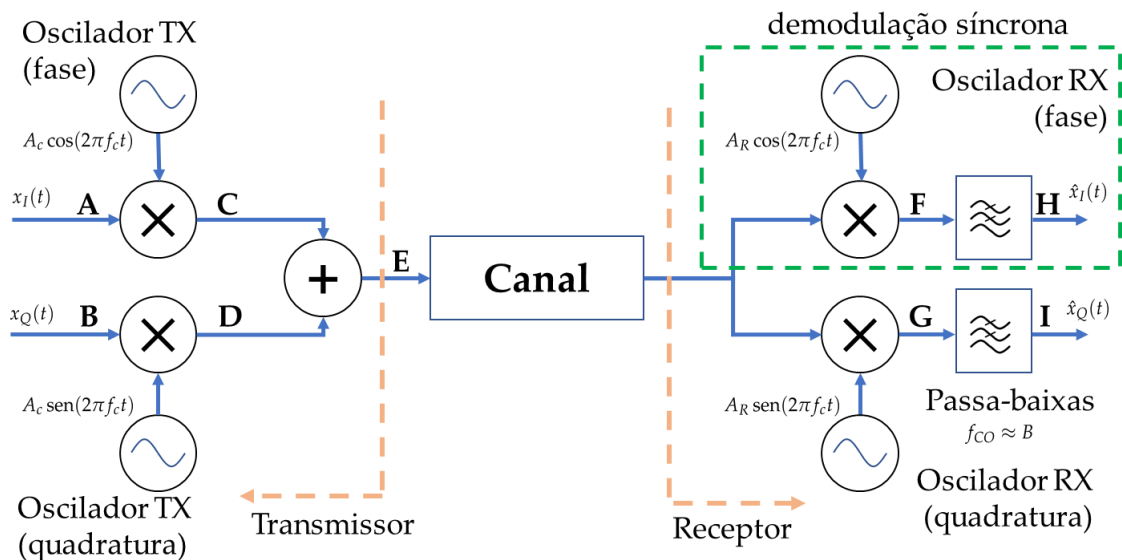


Figura 1. Modelo simplificado de transmissor QAM analógico.

A modulação QAM permite a transmissão de dois sinais ao mesmo tempo e na mesma frequência, pois a frequência da portadora  $f_c$  e a largura de banda  $B$  são as mesmas nas componentes em fase e quadratura. O receptor, se bem projetado, é capaz de separar  $x_I(t)$  e  $x_Q(t)$  da forma de onda modulada. O preço a pagar por aproveitar a mesma faixa do espectro para transmitir dois sinais simultaneamente é a complexidade do receptor.

Na recepção, utilizamos dois ramos de detecção do sinal. Na Figura 1, o ramo superior é responsável por extrair a componente em fase, e o inferior recupera a componente em quadratura. A ortogonalidade das portadoras em seno e cosseno garante que, à saída de cada ramo, apenas  $x_I(t)$  ou  $x_Q(t)$  sobreviva ao processo de demodulação. As amplitudes dos osciladores, tanto no transmissor quanto no receptor, não precisam ser necessariamente as mesmas e podem ser ajustadas independentemente.

## Atividade 02 – Modulação SSB

### Conceitos preliminares

As modulações AM-DSB+C, AM-DSB-SC e QAM geram sinais com largura de banda que é o dobro da largura de banda do sinal modulante. Das propriedades da Transformada de Fourier, sabemos que, quando os sinais são reais, a correspondente T.F. tem módulo par e fase ímpar. Isto significa que, tendo posse apenas das frequências positivas do espectro do sinal modulante  $M(f)$ , é possível obter  $M(-f) = M^*(f)$ . Portanto, para um sinal real, o semieixo positivo do espectro contém toda a informação espectral.

Este fato sugere que é possível utilizar apenas as frequências positivas do espectro da mensagem, de modo a economizar largura de banda ao realizar a transmissão. A Figura 2 ilustra o conceito: apenas a parcela do semieixo positivo de  $M(f)$  foi deslocada para o entorno da frequência da portadora. Como o sinal modulado  $v(t)$  também é um sinal real, naturalmente surge nas frequências negativas de  $V(f)$  uma réplica do semieixo negativo de  $M(f)$ .

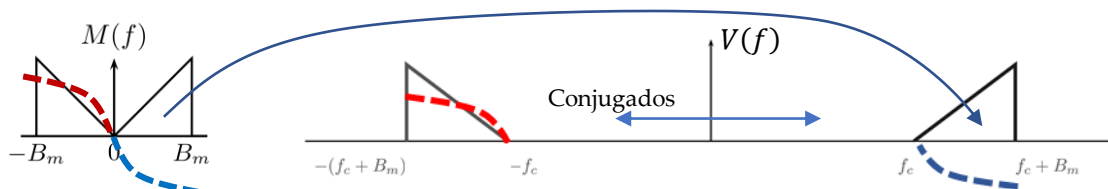


Figura 2: Modulação SSB, banda lateral superior.

Para obter um espectro como o da Figura 2, três técnicas podem ser utilizadas:

- Filtragem passa-bandas de uma das bandas laterais de um sinal AM-DSB-SC;
- Uso da Transformada de Hilbert em banda-base;
- Método de Weaver (Fig. 3).

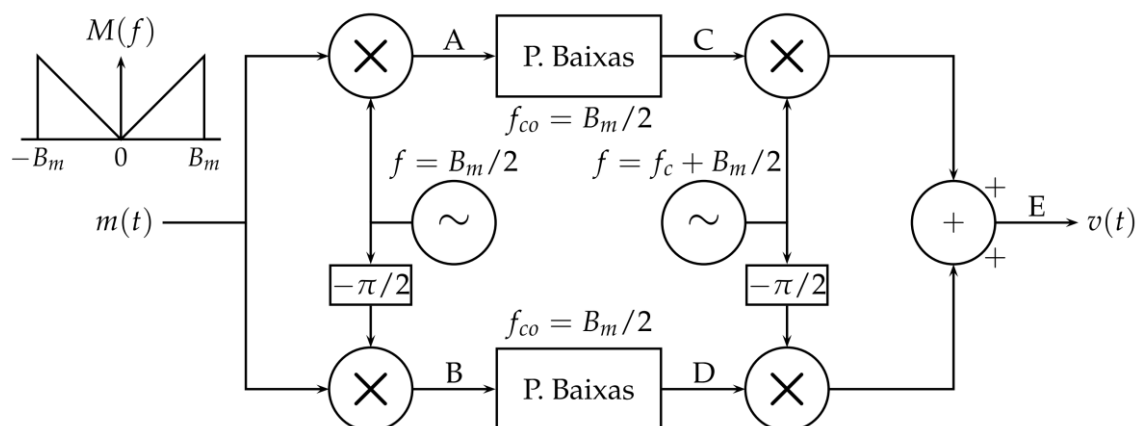


Figura 3 – Método de Weaver para geração de sinais SSB. Os defasadores de  $-\pi/2$  geram sinais senoidais a partir dos osciladores cossenoidais. Os filtros passa-baixas têm frequência de corte  $f_{co}$

Uma vez obtido o espectro do sinal modulado em SSB, o processo de demodulação é matematicamente simples: utilizamos demodulação síncrona com o ramo superior do receptor da Figura 1: um *mixer*, com entradas (i) sinal modulado e (ii) oscilador local em frequência  $f_c$ , seguido de um filtro passa-baixas.

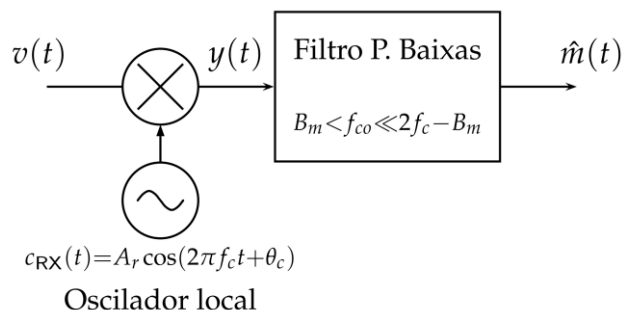


Figura 4 – Demodulador síncrono. A frequência e fase do oscilador local são exatamente as mesmas utilizadas pelo transmissor.

### Atividade 03 –Falha de Sincronismo no Receptor

Nos receptores QAM e SSB deste experimento, utilizamos inicialmente a demodulação perfeitamente **síncrona** (isto é, os osciladores no receptor têm **exatamente** a mesma frequência e fase do transmissor). Na prática, é impossível garantir que dois equipamentos satisfaçam esta condição. Vamos verificar o efeito de falhas no sincronismo utilizando osciladores no receptor que possuam:

- Exatamente a mesma frequência do transmissor, porém com fase diferente.
- Uma frequência ligeiramente maior do que a utilizada nos osciladores do transmissor.

## Relatório – Entregar até 17/09/2020

Faça um relatório descrevendo as sequencias de passos e análises pertinentes para chegar aos resultados das atividades remotas (ARs). Ilustre com as telas do GRC.

Apresente no início do relatório todos os cálculos teóricos solicitados e as tabelas no final.

### AR 01 – Modulação QAM

#### Setup da simulação AR01

Taxa de amostragem	128 ksps
Instrumentos virtuais	Osciloscópio Analisador de Espectro Geradores de Sinais Medidores RMS Filtros
Observações adicionais	Utilizar bloco “Throttle”

Para os sinais no transmissor (Tx) e receptor (Rx), use as configurações detalhadas a seguir

Sinal	Descrição
$x_I(t)$	Onda quadrada, $V_{\text{MAX}} = -V_{\text{MIN}} = 1 \text{ V}$ , frequência de 700 Hz, filtrada passa-baixas, utilizando filtro com frequência de corte 7 kHz, faixa de transição de 100 Hz.
$x_Q(t)$	Onda triangular, $V_{\text{MAX}} = -V_{\text{MIN}} = 1 \text{ V}$ , frequência de 1 kHz, também filtrada como o sinal acima.
Osciladores	(sen/cos) com frequência fixa $f_c = 10 \text{ kHz}$ , amplitude de $A_{TX} = A_{RX} = 2 \text{ V}$

Implemente o diagrama de blocos da Figura 1 e faça um print da tela (**Fig. 1.1**), utilizando como sinais  $x_I(t)$  e  $x_Q(t)$  os sinais de onda quadrada e triangular dos (blocos <<Signal Source>>) filtrados até 7 kHz. Este filtro é chamado de filtro anti-aliasing. Despreze o canal de transmissão, de modo que o foco da análise passe a ser no funcionamento do modulador e do demodulador.

**Projeto dos filtros de recepção.** Encontre a frequência de corte dos filtros passa-baixas de modo que esteja presente na saída de cada filtro 98% da potência total do sinal a ser recuperado, apresentando os cálculos teóricos (**T1a**). Expresse o resultado em função da frequência fundamental dos sinais periódicos onda quadrada e onda triangular.

**T1b)** Mostre os cálculos que indicam que os sinais recuperados  $\hat{x}_I(t)$  e  $\hat{x}_Q(t)$  são boas estimativas de  $x_I(t)$  e  $x_Q(t)$ , respectivamente.

#### a) Análise de sinal QAM

Apresente os sinais no tempo (**Fig. 1.2.x<sup>1</sup>**) e frequência (**Fig. 1.3.x**) nos pontos indicados na Figura 1 e interprete os resultados (**A1a**), em especial os sinais logo após a saída dos *mixers* na recepção.

<sup>1</sup> Considere x como uma indicação de subitens associados aos diferentes pontos do diagrama

Meça a potência nos mesmos pontos, usando o medidor RMS. Organize as medições de potência em uma tabela (Tab. 1.1).

### b) Ajuste de ganho no receptor

Fixe a amplitude dos osciladores no **transmissor** como sendo a do último número de sua matrícula (se acabar em zero, use 10). **Ajuste** o valor das amplitudes dos osciladores no **receptor** de modo que as amplitudes dos sinais recuperados sejam exatamente iguais às definidas no transmissor. Apresente simultaneamente no domínio do tempo os sinais demodulados  $\hat{x}_I(t)$  (Fig. 1.4) e  $\hat{x}_Q(t)$  (Fig. 1.5) e os correspondentes sinais originais. Indique na legenda a amplitude  $A_{TX}$  utilizada.

**A1b)** Qual deve ser a relação entre as amplitudes  $A_{TX}$  e  $A_{RX}$  para preservar a potência do sinal recebido, quando comparada com a potência do sinal a transmitir?

## AR 02 – Modulação SSB com método de Weaver

### Setup da simulação AR02

Taxa de amostragem	128 ksps
Instrumentos virtuais	Osciloscópio Geradores de sinal Gerador de ruído branco Filtros para modulador e demodulador. Analisador de Espectro, Medidor RMS
Observações adicionais	Utilizar filtros pré-definidos (passa-baixas, passa-bandas) Utilizar bloco “Throttle”

Implemente um gerador SSB utilizando o método de Weaver (Figura 3). Utilize na entrada um sinal ruído branco filtrado passa-baixas, com frequência máxima dada pelo seu **último** dígito do número de matrícula multiplicado por 500. Exemplo: matrícula 12345678 → frequência máxima = 4 kHz. Se o dígito for zero, use 10 para obter 5 kHz. Utilize uma faixa de transição dos filtros de 50 Hz.

Nos osciladores do transmissor e receptor, utilizar como frequência  $f_c$  o **penúltimo** dígito do número da matrícula multiplicado por 3000. Exemplo: matrícula 12345678 → frequência = 21 kHz. Se o dígito for zero, use 10 para obter 30 kHz). Faça uma *print* (Fig. 2.1) do diagrama de blocos indicando na legenda os valores das frequências usadas.

Verifique os espectros (Fig. 2.2.x) nos pontos indicados na Figura 3.

**A2a)** Usando o mesmo sinal de entrada (ruído filtrado), compare o espectro do sinal modulado SSB com o de uma modulação AM-DSB-SC (Fig. 2.3).

No transmissor, altere a frequência dos osciladores após os filtros passa-baixas para  $f = f_c - B_m/2$  e simultaneamente o sinal do ramo na soma logo antes da saída (transforme o somador em um subtrator). **A2b)** Verifique o efeito no domínio da frequência (Fig. 2.4).

**T2a)** No relatório, a respeito da geração de sinais SSB, comente sobre a diferença entre utilizar o método de Weaver e utilizar filtragem passa-bandas de um sinal AM-DSB-SC.

### AR 03 – Falha de sincronismo em QAM

#### Setup da simulação AR03

Taxa de amostragem	240 kbps
Instrumentos virtuais	Osciloscópio Geradores de função no TX em 10 kHz Geradores de função no RX com atraso de fase
Observações adicionais	Utilizar bloco “Throttle” Não utilizar <<QT GUI Range>>. Deixar todos os valores fixos para melhores resultados.

#### a) Falha de sincronismo de fase

Utilizando o mesmo modulador QAM da AR 01 (exceto pela taxa de amostragem agora de 240 kbps), altere os osciladores do receptor para os seguintes cenários:

- Diferença de fase de  $+30^\circ$  (2 amostras) nos osciladores de fase e quadratura, em relação aos osciladores na transmissão.
- Repita para diferença de fase de  $+90^\circ$  (6 amostras).

Utilize o bloco <<delay>> para implementar a diferença de fase, como já realizado no Exp 01. Faça um print do esquema (**Fig. 3.1**).

Apresente **simultaneamente**, e para cada item acima, os sinais demodulados  $\hat{x}_I(t)$  (**Fig. 3.2.x**) e  $\hat{x}_Q(t)$  (**Fig. 3.3.x**) no domínio do tempo com os respectivos sinais originais.

**A3a)** Observe e interprete o efeito observado.

**T3a)** Apresente os cálculos de  $\hat{x}_I(t)$  estimado.

#### b) Falha de sincronismo de frequência.

Mantenha a fase síncrona entre transmissor e receptor (diferença de fase zero). Porém, no receptor ajuste a frequência para 10.000,1 Hz (diferença de 0,1 Hz entre osciladores TX e RX).

**A3b)** Observe e interprete o efeito no domínio do tempo, mostrando **simultaneamente** os sinais demodulados e as mensagens  $x_I(t)$  (**Fig. 3.4**) e  $x_Q(t)$  (**Fig. 3.5**).

**T3b)** Apresente os cálculos de  $\hat{x}_I(t)$  estimado.

**A3c)** Com base nos resultados observados, comente sobre a necessidade de implementar mecanismos de ajuste de sincronismo de frequência e fase em receptores que fazem uso de demodulação síncrona.