

▪ Carlos Omar Ramos Linares
Edward Paul Guillén Pinto
Leonardo J. Ramírez López ▪

Conceptos y experiencias en comunicaciones análogas




Editorial
Neogranadina

Catalogación en la publicación – Biblioteca Nacional de Colombia

Ramos Linares, Carlos Omar

Conceptos y experiencias en comunicaciones análogas / Carlos Omar Ramos Linares, Edward Paul Guillén Pinto, Leonardo J. Ramírez López. -- Bogotá : Universidad Militar Nueva Granada, 2019. pp. 248 (Docencia)

Incluye datos biográficos de los autores e índice analítico. -- Contiene referencias bibliográficas.

ISBN digital 978-958-8795-87-4

ISBN 978-958-8795-86-7

I. Sistemas de telecomunicaciones I. Guillén Pinto, Edward Paul II. Ramírez López, Leonardo Juan III. Título IV. Serie

CDD: 621.382 ed. 23

CO-BoBN- a1044414



Conceptos y experiencias en comunicaciones análogas

© Carlos Omar Ramos Linares, Edward Paul Guillén Pinto,
Leonardo J. Ramírez López.

© Universidad Militar Nueva Granada

Colección Docencia

© Vicerrectoría de Investigaciones

© Editorial Neogranadina

Bogotá, Colombia

editorial.neogranadina@unimilitar.edu.co

- Carlos Omar Ramos Linares
Edward Paul Guillén Pinto
Leonardo J. Ramírez López ▪

CONCEPTOS Y EXPERIENCIAS EN COMUNICACIONES ANÁLOGAS

Cómo citar:

APA:

Ramos Linares, C. O., Guillén Pinto, E. P., y Ramírez López, L. J. (2019). *Conceptos y experiencias en comunicaciones análogas*. Bogotá: Editorial Neogranadina.

MLA:

Ramos Linares, Carlos Omar, Edward Paul Guillén Pinto y Leonardo J. Ramírez López. *Conceptos y experiencias en comunicaciones análogas*. Bogotá: Editorial Neogranadina, 2019.

Chicago:

Ramos Linares, Carlos Omar, Edward Paul Guillén Pinto y Leonardo J. Ramírez López. *Conceptos y experiencias en comunicaciones análogas*. Colección Docencia. Bogotá: Editorial Neogranadina, 2019.



Conceptos y experiencias en comunicaciones análogas

• Carlos Omar Ramos Linares* • Leonardo Juan Ramírez López** • Edward Paul Guillén Pinto***

RESUMEN Este libro se propone abordar las comunicaciones análogas desde los fundamentos conceptuales y trigonométricos hasta el análisis de señales y de los tipos de modulaciones análogas. Retoma la trigonometría aplicada en las telecomunicaciones en lo que se refiere a funciones, identidades y operaciones con números complejos; luego, continúa con los principios de comunicación análoga, como las señales, el espectro electromagnético y el ruido eléctrico. Finaliza con el estudio de las modulaciones en amplitud y angular, técnicas que permiten el aprovechamiento del canal de comunicación al transmitir más información de forma simultánea y al mejorar la resistencia contra posibles ruidos e interferencias. Todos los temas se acompañan con ejemplos solucionados y ejercicios que facilitan su estudio y comprensión.

PALABRAS CLAVE

comunicaciones análogas; tecnologías de la información; circuitos; señales; ruido; modulación

DOI: <https://doi.org/10.18359/9789588795874>

* Profesor titular e investigador de la Universidad Militar Nueva Granada. Contacto: carlos.ramos@unimilitar.edu.co

** Profesor titular, investigador asociado por Colciencias y líder del grupo de investigación en telemedicina de la Universidad Militar Nueva Granada. Contacto: leonardo.ramirez@unimilitar.edu.co

*** Profesor titular y director del programa de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Militar Nueva Granada Contacto: edward.guillen@unimilitar.edu.co



Concepts and Experiences in Analog Communications

• Carlos Omar Ramos Linares* • Leonardo Juan Ramírez López** • Edward Paul Guillén Pinto***

ABSTRACT This book aims to address analog communications, from conceptual and trigonometric foundations to the analysis of signals and types of analog modulations. It broaches with trigonometry applied to telecommunications, such as functions, identities, and operations with complex numbers; followed by the principles of analog communication such as signals, electromagnetic spectrum, and electrical noise. It ends with the study of amplitude and angle modulations, techniques which allow to take advantage of the communication channel by transmitting more information simultaneously and improving resistance against noise and interference. All topics are accompanied by examples and exercises that facilitate their study and understanding.

KEYWORDS

analog communications; information technologies; circuits, signals; noise; modulation

DOI: <https://doi.org/10.18359/9789588795874>

* Associate Professor and Researcher at the Universidad Militar Nueva Granada.
E-mail: carlos.ramos@unimilitar.edu.co

** Associate Professor, Associate Researcher for Colciencias and Leader of the Telemedicine Research Group at the Universidad Militar Nueva Granada.
E-mail: leonardo.ramirez@unimilitar.edu.co

*** Associate Professor and Director of the Telecommunications Engineering Program at the Universidad Militar Nueva Granada. E-mail: edward.guillen@unimilitar.edu.co

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Militar Nueva Granada por facilitar la producción académica de sus profesores, por dar a disposición los laboratorios de telecomunicaciones, programas de simulación y acceso a la información bibliográfica que fueron el soporte de las teorías expuestas, de hecho algunas de las figuras se obtuvieron gracias a los instrumentos disponibles.

Dedicatoria

A nuestras familias por su incondicional apoyo.

Contenido

Introducción	29
1. Fundamentos de trigonometría en telecomunicaciones	34
Funciones trigonométricas básicas	36
Identidades trigonométricas básicas	42
Números complejos	44
Número real	45
Número imaginario	45
Representación de complejos	45
Conjugado de un complejo	46
Relación de Euler	48
Operaciones con números complejos	50
Ejercicios	53
Referencias	54
2. Señales	55
Conceptos	57
Clasificación de las señales	58
Descripción matemática de una señal	60
Señales compuestas	64
Series de Fourier para señales periódicas	72
Serie compleja	82
Transformada de Fourier	86
Ejercicios	91
Referencias	95

3. Conceptos básicos asociados a las comunicaciones	97
Esquema básico de comunicación	99
Espectro electromagnético	100
Longitud de onda	101
Relación de la longitud en la señal	105
El sonido	106
El decibel usado en comunicaciones	109
El decibel para potencias	110
El decibel para voltajes y corrientes	113
Nivel de presión de sonido (SPL)	114
Otras medidas en decibeles	115
Relación entre decibeles	117
Manejo de dB para sistemas en cascada	122
Otras medidas en dB	122
Ejercicios	125
Referencias	127
4. Ruido eléctrico	129
Temperatura de ruido equivalente	133
Relación de señal a ruido (SNR)	134
Figura de ruido (NF)	135
Sistemas ruidosos en cascada	138
Ejercicios	145
Referencias	147
5. Modulación de amplitud	149
Proceso matemático	152
Consideración de frecuencia	157
Consideraciones sobre el índice de modulación	159
Cálculo de potencia	162
Cálculo de corriente	165

Factor de eficiencia en AM	166
Método del trapecio para medir AM	173
Banda base y su efecto en AM	177
Análisis de frecuencia para una señal cualquiera	180
Circuitos moduladores de AM	181
Montajes con equipos de laboratorio	181
Montajes con circuitos	184
Ancho de banda en radiodifusión de AM	186
Demoduladores AM	187
Detección coherente	187
Detector de envolvente	189
Moduladores derivados de AM	190
AM doble banda lateral con portadora suprimida	190
Banda lateral única	191
Ejercicios	193
Referencias	197
6. Modulación angular	199
Modulación de fase	202
Modulación de frecuencia	203
Análisis matemático de FM	207
FM de banda angosta	214
Ancho de banda en FM	217
Potencia promedio de FM	219
Circuitos moduladores de FM	227
Afectación del ruido en la modulación angular	227
Modulador de FM con oscilador Hartley	229
Modulador FM con transistores	230
Detección de FM	231
Proceso matemático	231
Circuito demodulador directo por derivación	233

Receptor superheterodino	234
FM estéreo	235
Ejercicios	237
Referencias	239
Índice analítico	241

Índice de tablas y figuras

Figuras

Figura 1.1. Representación de a) un grado sexagesimal y b) un radián.	38
Figura 1.2. Presentación de ángulos en a) un triángulo y b) una circunferencia.	38
Figura 1.3. Representación de las funciones seno y coseno.	39
Figura 1.4. Funciones seno y coseno como función impar y función par, respectivamente.	41
Figura 1.5. Función seno generada desde Matlab.	42
Figura 1.6. Representación gráfica de un número complejo.	47
Figura 2.1. Ejemplo de señal periódica.	61
Figura 2.2. Gráfica de una señal periódica cosenoidal.	63
Figura 2.3. Señal periódica con desplazamiento por nivel DC. a) Circuito generador de nivel DC, b) señal mostrada en el osciloscopio.	63
Figura 2.4. Gráfica para la señal del ejemplo.	65
Figura 2.5. Gráfica para la señal del ejemplo 2.	66
Figura 2.6. a) Una señal original y b) una señal desplazada en medio periodo.	67
Figura 2.7. Gráficas correspondientes al ejemplo 3. a) y b) Señales componentes y c) señal resultante.	68

Figura 2.8. Señal compuesta $m(t)$ en el dominio del tiempo.	72
Figura 2.9. Gráficas en el dominio de la frecuencia para a) amplitud y b) fase.	72
Figura 2.10. Espectro bilateral de frecuencia para a) amplitud y b) fase.	73
Figura 2.11. Señal cuadrada de ciclo útil de 50 %.	75
Figura 2.12. Notación para los valores de $n \pi/2$.	76
Figura 2.13. Componentes trigonométricos de la serie de Fourier para el ejemplo 5. a) Tabla de datos y b) gráfica de componentes armónicos.	77
Figura 2.14. Circuito rectificador de media onda para el ejemplo 6.	78
Figura 2.15. Rectificador de media onda del ejemplo 6.	78
Figura 2.16. Notación para los valores enteros impares del coseno.	80
Figura 2.17. Espectro de amplitud para el ejemplo 6.	83
Figura 2.18. Espectro de fase para el ejemplo 6.	83
Figura 2.19. Onda rectangular como función par.	86
Figura 2.20. Función $\text{SenC}(x)$.	87
Figura 2.21. Componentes armónicos para el ejemplo 7.	88
Figura 2.22. Principio de ubicuidad para la transformada de Fourier a partir de a) una señal periódica hacia b) una señal con periodo infinito.	89
Figura 2.23. Arreglo de señales para el ejercicio 1.	93
Figura 2.24. Señal para el ejercicio 3.	93
Figura 2.25. Señal para el ejercicio 5.	93
Figura 2.26. Gráfica para el ejercicio 7.	94

Figura 2.27. Gráficas para el ejercicio 10.	94
Figura 2.28. Gráfica para el ejercicio 11.	94
Figura 2.29. Señal para el ejercicio 12.	94
Figura 2.30. Señal para el ejercicio 13.	95
Figura 3.1. Esquema básico de un sistema de comunicaciones.	102
Figura 3.2. Composición de una onda electromagnética.	103
Figura 3.3. Longitud de onda de una señal.	103
Figura 3.4. Diagrama de percepción de los colores por el ser humano.	106
Figura 3.5. Antena Yagi-Uda de tres componentes.	107
Figura 3.6. Práctica de medición de sonido vocal.	109
Figura 3.7. Laboratorio para prueba de audición del rango de frecuencias.	110
Figura 3.8. Variables en un sistema de entrada y salida.	111
Figura 3.9. Trazado de un papel semilogarítmico.	112
Figura 3.10. Cuadrícula semilogarítmica.	112
Figura 3.11. Representación de un sistema amplificador, expresado en dB.	113
Figura 3.12. Sistema de potencia para el ejemplo 5.	113
Figura 3.13. Esquema de potencias para el ejemplo 6.	114
Figura 3.14. Diagrama de potencias para el ejemplo 8.	120
Figura 3.15. Diagrama de potencias para el ejemplo 9.	121
Figura 3.16. Resultado para el ejemplo 9.	123
Figura 3.17. El dB en un sistema en cascada.	124
Figura 3.18. Diagrama de potencias para el ejercicio 12.	128

Figura 4.1. Proceso de una señal respecto al ruido como señal aditiva.	134
Figura 4.2. Esquema para representar la temperatura equivalente de un amplificador.	135
Figura 4.3. Comparación de una señal de información respecto al ruido y su resultado.	136
Figura 4.4. Temperatura de ruido equivalente de un atenuador.	138
Figura 4.5. Esquema de un sistema ruidoso en cascada.	140
Figura 4.6. Consideración de un sistema de recepción ruidoso.	141
Figura 4.7. Esquema en bloques del sistema de recepción.	141
Figura 4.8. Diagrama en bloques del sistema de recepción del ejemplo 6.	143
Figura 4.9. El sistema con la antena cerca de la antena.	144
Figura 5.1. Obtención de una señal modulada en amplitud a partir de una moduladora y una portadora.	155
Figura 5.2. Espectro de frecuencias para una señal modulada en amplitud.	157
Figura 5.3. Espectro de frecuencia para el ejemplo 7.	158
Figura 5.4. Señal en el dominio del tiempo para el ejemplo dado.	159
Figura 5.5. Espectro de amplitud de voltaje comparado con la frecuencia moduladora.	160
Figura 5.6. Posibilidades de recuperar la señal de información de acuerdo a la posición de la LSB.	160
Figura 5.7. Señal AM para $m < 1$.	161
Figura 5.8. Señal AM para $m = 1$	161
Figura 5.9. Señal AM para $m > 1$	162

Figura 5.10. Definición de las amplitudes máxima y mínima para reconsiderar el índice de modulación.	162
Figura 5.11. Señal modulada en el tiempo para el ejemplo 8.	166
Figura 5.12. Espectro de potencia del ejemplo 8.	167
Figura 5.13. Espectros de a) potencia y b) amplitud para el ejemplo 9.	171
Figura 5.14. Señal AM en el dominio del tiempo para el ejemplo 9.	171
Figura 5.15. Espectro de frecuencias para el ejemplo 10.	172
Figura 5.16. Señal AM en el dominio del tiempo (no se guardan proporciones).	175
Figura 5.17. Montaje de laboratorio para medir el índice de modulación por el método de trapecio.	176
Figura 5.18. Señal AM en el dominio del tiempo del programa en Matlab.	177
Figura 5.19. Gráfica del trapecio del programa en Matlab.	178
Figura 5.20. Parámetros para medir el índice de modulación por el método del trapecio.	178
Figura 5.21. Medición de los parámetros en el trapecio para calcular el índice de modulación.	179
Figura 5.22. Modulación de amplitud de una señal no pura en el dominio del tiempo y dominio de la frecuencia: a) moduladora en el dominio del tiempo, b) moduladora en el dominio de la frecuencia, c) portadora en el dominio del tiempo, d) portadora en el dominio de la frecuencia, e) señal modulada en AM en el dominio del tiempo y f) señal modulada en AM en el dominio de la frecuencia.	180

Figura 5.23. Ubicación de una señal modulada con un ancho de banda. a) Banda base, b) espectro AM.	181
Figura 5.24. Espectro bilateral de frecuencia para una señal cualquiera modulada en AM. a) Señal en el dominio del tiempo, b) espectro bilateral de frecuencia.	182
Figura 5.25. Montaje de instrumentos para modulación AM interna.	184
Figura 5.26. Montaje de instrumentos para modulación AM externa.	185
Figura 5.27. Laboratorio para medir el índice de modulación por el método del trapecio.	186
Figura 5.28. Modulador AM usando un sumador.	187
Figura 5.29. Modulador AM con transistor.	187
Figura 5.30. a) Ancho de banda para el espectro de AM comercial, b) Ancho de banda para una estación de AM.	189
Figura 5.31. Detección coherente.	190
Figura 5.32. Esquema de un detector de envolvente.	191
Figura 5.33. Modulador DSB.	193
Figura 5.34. Modulador de banda lateral única.	194
Figura 5.35. Diagrama de tiempos para el ejercicio 7.	196
Figura 5.36. Circuito para el ejercicio 8.	196
Figura 5.37. Espectro de frecuencia para el ejercicio 9.	196
Figura 5.38. Gráfica para el ejercicio 10.	197
Figura 6.1. Propiedades de una señal modulada en frecuencia.	208
Figura 6.2. Obtención de PM y FM a partir de una onda seno: a) señal moduladora, b) señal moduladora derivada en el tiempo,	

c) señal modulada en FM y d) señal modulada en PM a partir de la señal en b). 210

Figura 6.3. Obtención de PM y FM a partir de una onda rectangular: a) señal moduladora, b) señal moduladora derivada en el tiempo, c) señal modulada en FM y d) señal modulada en PM a partir de la señal en b). 211

Figura 6.4. Distribución de los componentes armónicos de FM. 216

Figura 6.5. a) Gráfica del valor absoluto de coeficientes y b) vista del analizador de espectros para una señal similar. 216

Figura 6.6. Comportamiento de los coeficientes de Bessel en función del índice de modulación. 217

Figura 6.7. Espectro de frecuencia de FM de banda angosta. 219

Figura 6.8. Espectro de frecuencia para el ejemplo 1 a). 220

Figura 6.9. Espectro de frecuencia para el ejemplo 1 b). 221

Figura 6.10. Determinación del número de armónicas para calcular el ancho de banda en FM. 222

Figura 6.11. Espectro de amplitud de voltaje del ejemplo 2. 226

Figura 6.12. Espectro de potencias en dBm del ejemplo 2. 226

Figura 6.13. Espectro bilateral de amplitud para el ejemplo 3. 227

Figura 6.14. Valor absoluto del espectro de amplitud del ejemplo 3. 227

Figura 6.15. Filtro pasa altos y circuito para la etapa de preénfasis, antes del transmisor. 232

Figura 6.16. Filtro pasa bajos en la etapa de énfasis en el receptor. 232

Figura 6.17. Modulador FM usando un oscilador Hartley.	233
Figura 6.18. Modulador FM con transistores.	234
Figura 6.19. Señal FM derivada para detección de la moduladora.	236
Figura 6.20. Proceso de demodulación de FM para una señal coseno, luego de derivar.	237
Figura 6.21. Detector de FM por derivación.	237
Figura 6.22. Esquema de un receptor superheterodino.	238
Figura 6.23. Generación de banda base para FM estéreo.	239
Figura 6.24. Espectro de banda base para FM estéreo.	240
Figura 6.25. Señal en el dominio del tiempo para el ejercicio 5.	241
Figura 6.26. Espectro de frecuencia para el ejercicio 7.	242
Figura 6.27. Circuito resonante para los ejercicios 10 y 11.	242

Tablas

Tabla 1.1. Grados sexagesimales con su equivalencia en radianes.	40
Tabla 2.1. Primeros 15 armónicos del ejemplo.	82
Tabla 2.2. Tabulación de los componentes complejos del ejemplo 7.	88
Tabla 3.1. Designación y algunas aplicaciones de las bandas de frecuencia CCIR.	105
Tabla 3.2. Tabla de sonidos para consignar las frecuencias.	109
Tabla 3.3. Cuadro para consignar el rango de audición.	110
Tabla 3.4. Diferentes sonidos que son percibidos por el ser humano (ITU-R 468).	116
Tabla 3.5. Símbolos usados en los bloques de telecomunicaciones.	123
Tabla 6.1. Tabla de coeficientes de Bessel.	214
Tabla 6.2. Amplitudes de los armónicos para el ejemplo 1 b).	221
Tabla 6.3. Componentes del ejemplo.	224
Tabla 6.4. Tabla de valores para el ejemplo 2.	225
Tabla 6.5. Valores para el ejemplo 3.	228

Tabla 6.6. Resumen de amplitudes de armónicas para el ejemplo 3.	228
Tabla 6.7. Potencias de las armónicas para el ejemplo 3.	229
Tabla 6.8. Valores de voltaje y potencias para el ejemplo 3 b).	230