

INTRODUCCIÓN A LAS SEÑALES  
Y LOS SISTEMAS DISCRETOS

Diego H. Milone

Hugo L. Rufiner

Rubén C. Acevedo

Leandro E. Di Persia

Humberto M. Torres

Facultad de Ingeniería

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ENTRE RÍOS

004.1    Introducción a las señales y los sistemas discretos / Diego  
CDD      Humberto Milone...[et.al.]; con prólogo de Luis Florentino Rocha.  
            – 1ª ed. 1ª reimp.– Entre Ríos : Universidad Nacional de  
            Entre Ríos, 2009.  
            252 p. : il. ; 21x14 cm. (Académica; 7)

ISBN 978-950-698-173-0

1. Bioingeniería. I. Milone, Diego Humberto II. Rocha, Luis  
Florentino, prólog.

Coordinación de la edición: Gustavo Esteban Martínez

Asistente de edición: Gastón Schlotthauer

Corrección: Andrea Vittori

Diseño gráfico de la serie: Guillermo Mondejar

©Diego H. Milone, Hugo L. Rufiner, Rubén C. Acevedo,

Leandro E. Di Persia, Humberto M. Torres.

©EDUNER. Editorial de la Universidad Nacional de Entre Ríos

Entre Ríos, Argentina, 2009.

EDUNER

Eva Perón 24 / E3260FIB

Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina

eduner@rect.uner.edu.ar

Queda hecho el depósito que marca la ley 11.723.

No se permite la reproducción parcial o total, el almacenamiento, el alquiler, la transmisión o la transformación de este libro, en cualquier forma o por cualquier medio, sea electrónico o mecánico, mediante fotocopias, digitalización u otros métodos, sin el permiso previo y escrito del editor. Su infracción está penada por las leyes 11.723 y 25.446.

Impreso en Argentina

Serie académica

ISBN 978-950-698-173-0

# ÍNDICE

Prólogo . . . . .	13
Prefacio . . . . .	15
Capítulo I: Introducción a señales . . . . .	19
I.1. Introducción . . . . .	20
I.2. Clasificación de las señales . . . . .	24
I.2.1. Clasificación Fenomenológica . . . . .	24
I.2.2. Clasificación Morfológica . . . . .	26
I.3. Ruido en señales . . . . .	30
I.4. Teoría de la comunicación . . . . .	32
I.4.1. Teoría de la señal . . . . .	32
I.4.2. Teoría de la información y de la codificación . . . . .	33
I.5. Procesamiento de señales . . . . .	35
I.5.1. Análisis de señales . . . . .	38
I.6. Operaciones elementales con señales . . . . .	41
I.6.1. Operaciones unarias . . . . .	41
I.6.2. Operaciones binarias . . . . .	43
I.7. Preguntas . . . . .	43
I.8. Trabajos prácticos . . . . .	46

Capítulo II: Espacios de señales . . . . .	49
II.1. Introducción . . . . .	50
II.1.1. Desarrollo intuitivo . . . . .	50
II.2. Señales, vectores y álgebra lineal . . . . .	52
II.2.1. Normas . . . . .	53
II.2.2. Producto interno . . . . .	55
II.3. Espacios vectoriales y señales . . . . .	57
II.3.1. Conjunto de señales . . . . .	57
II.3.2. Espacios de señales . . . . .	59
II.3.3. Espacios vectoriales . . . . .	60
II.4. Bases y transformaciones . . . . .	63
II.4.1. Dependencia lineal y conjuntos generadores . . . . .	63
II.4.2. Bases . . . . .	64
II.4.3. Ortogonalidad y ortonormalidad . . . . .	65
II.4.4. Aproximación de señales . . . . .	66
II.4.5. Cambio de base . . . . .	70
II.4.6. Transformaciones lineales . . . . .	74
II.5. Preguntas . . . . .	76
II.6. Trabajos prácticos . . . . .	78
 Capítulo III: Transformada Discreta de Fourier . . . . .	 81
III.1. Introducción . . . . .	82
III.2. Familia de bases de Fourier . . . . .	83
III.2.1. Series seno . . . . .	83
III.2.2. Series coseno . . . . .	84
III.2.3. Serie exponencial de Fourier . . . . .	85
III.2.4. Transformada de Fourier de Tiempo Discreto . . . . .	86
III.2.5. Transformada Continua de Fourier . . . . .	87
III.3. Exponenciales complejas discretas . . . . .	87
III.4. Transformada Discreta de Fourier . . . . .	91
III.5. Propiedades de la TDF . . . . .	94

III.6. Relación entre la TCF y la TDF . . . . .	96
III.7. Utilización de ventanas . . . . .	100
III.8. Resolución temporal y frecuencial . . . . .	101
III.9. Representación matricial de la TDF . . . . .	104
III.10. Transformada Rápida de Fourier . . . . .	107
III.11. Preguntas . . . . .	111
III.12. Trabajos prácticos . . . . .	113
Capítulo IV: Introducción a sistemas . . . . .	119
IV.1. Introducción . . . . .	120
IV.2. Interconexión de sistemas . . . . .	120
IV.3. Propiedades de los sistemas . . . . .	122
IV.4. Ecuaciones en diferencias . . . . .	125
IV.5. Representación de sistemas LTI discretos . . . . .	126
IV.6. Preguntas . . . . .	129
IV.7. Trabajos prácticos . . . . .	129
Capítulo V: Convolución discreta . . . . .	133
V.1. Introducción . . . . .	134
V.2. Convolución lineal . . . . .	134
V.3. Convolución circular . . . . .	139
V.4. Relación entre convolución lineal y circular . . . . .	141
V.5. Deconvolución . . . . .	141
V.6. Preguntas . . . . .	147
V.7. Trabajos prácticos . . . . .	147
Capítulo VI: Transformada Z . . . . .	151
VI.1. Introducción . . . . .	152
VI.2. Definición de Transformada Z . . . . .	152
VI.2.1. Convergencia de la Transformada Z . . . . .	154

VI.2.2. La Transformada Z inversa . . . . .	156
VI.3. Propiedades de la Transformada Z . . . . .	157
VI.4. Representación de sistemas discretos mediante la Transformada Z . . . . .	158
VI.4.1. Transformación de Euler . . . . .	161
VI.4.2. Transformación bilineal . . . . .	163
VI.5. Trabajos prácticos . . . . .	167
 Capítulo VII: Identificación de sistemas mediante predicción lineal . . . .	169
 VII.1. Introducción . . . . .	170
VII.1.1. Técnicas convencionales . . . . .	171
VII.1.2. Técnicas no convencionales . . . . .	172
VII.2. Análisis de la respuesta para sistemas continuos . . . . .	172
VII.3. Métodos de predicción lineal . . . . .	174
VII.3.1. El modelo ARMA . . . . .	174
VII.3.2. El modelo AR . . . . .	175
VII.3.3. Cuadrados mínimos . . . . .	176
VII.3.4. Sistema de Wiener-Hopf para señales determinísticas . . . . .	178
VII.3.5. Sistema de Wiener-Hopf para señales aleatorias . . . . .	180
VII.3.6. Resolución del sistema de Wiener-Hopf . . . . .	182
VII.3.7. Determinación de la constante de ganancia G . . . . .	185
VII.4. Estimación del orden . . . . .	186
VII.4.1. Error de predicción final . . . . .	186
VII.4.2. Criterio de Akaike . . . . .	187
VII.5. Preguntas . . . . .	188
VII.6. Trabajos prácticos . . . . .	189
 Capítulo VIII: Identificación de sistemas no lineales mediante algoritmos genéticos . . . . .	193
 VIII.1. Introducción . . . . .	194
VIII.2. Estructura de un AG . . . . .	195

VIII.3. Diseño de la solución de un problema mediante AGs . . . . .	196
VIII.4. Representación de los individuos . . . . .	197
VIII.5. Función de fitness . . . . .	199
VIII.6. Selección . . . . .	199
VIII.6.1. Rueda de ruleta . . . . .	200
VIII.6.2. Ventanas . . . . .	201
VIII.6.3. Competencias . . . . .	201
VIII.7. Reproducción y operadores de variación . . . . .	201
VIII.7.1. Mutaciones . . . . .	202
VIII.7.2. Cruzas . . . . .	203
VIII.8. Características principales . . . . .	203
VIII.9. Introducción a los fundamentos matemáticos . . . . .	207
VIII.10. Trabajos prácticos . . . . .	208
Apéndice A: Octave (v2.1.36) . . . . .	213
Apéndice B: Comandos de SciLab (v2.6) . . . . .	221
Apéndice C: Comandos de MatLab (v4.2) . . . . .	231
Bibliografía . . . . .	240
Autores . . . . .	245

## PRÓLOGO

Escribir la presentación de un libro suele ser una empresa de gran responsabilidad y en este caso se suma el hecho de que uno de los autores (H.L.R) ha sido uno de mis mejores alumnos. No obstante, esta responsabilidad ha sido facilitada por la excepcional calidad de esta obra que, además de ser clara y concisa, posee como valor principal el de mostrar las técnicas de procesamiento de señales y de estudio de sistemas que han constituido la base para el desarrollo de la tecnología actual. La misma ha revolucionado nuestra sociedad y continúa evolucionando rápidamente, principalmente en el campo digital.

Resulta sorprendente descubrir que todos los seres vivos realizan, sin sospecharlo, análisis de señales similares a los aquí tratados. Por ejemplo, tanto una planta carnívora como un tigre pueden distinguir fácilmente sus respectivas presas, ya sea por su olor, su aspecto, sus movimientos o sus sonidos característicos. Sin embargo sólo nuestra especie ha podido comprender estos fenómenos y describirlos en términos de un lenguaje matemático. Una paloma puede distinguir, con mayor precisión que nosotros, diferencias sutiles en el canto de otras aves de su propia especie, pero el hombre es el único que puede preguntarse el por qué y el cómo de todos estos procesos. Podríamos decir que varios de ellos involucran técnicas semejantes al análisis de Fourier, no obstante sólo nosotros somos capaces de plantear un modelo o teoría como ésta que permita estudiarlos.

Además, a medida que descubrimos sus limitaciones, podemos proponer nuevas teorías para mejorar nuestro entendimiento del mundo.

En este libro se revisan los fundamentos de diferentes métodos para el estudio de los sistemas y la extracción de información útil de las señales, aplicables en campos tan disímiles como la biología, la geología, la economía o la astronomía, entre muchos otros.

Mis felicitaciones a los autores, que hago extensivas a la editorial de la Universidad Nacional de Entre Ríos, por haber realizado este esfuerzo, cada vez más raro en estos tiempos:

*Luis F. Rocha*