

# **COMUNICACIONES ANALOGICAS**

Juan A. Fernández Rubio

Mayo 1999

## TEMA I.- SISTEMAS LINEALES

<b>I.1.- INTRODUCCION : SEÑALES Y SISTEMAS</b>	<b>1</b>
<b>I.1.1.- SEÑALES</b>	<b>1</b>
<b>I.1.2.- SISTEMAS</b>	<b>2</b>
I.1.2.1.- INTERCONEXION DE SISTEMAS	3
I.1.2.2.- SISTEMAS LINEALES	5
I.1.2.3.- SISTEMAS INVARIANTES	5
I.1.2.4.- CAUSALIDAD	6
I.1.2.5.- ESTABILIDAD	7
<b>I.2.- CARACTERIZACION DE SISTEMAS LINEALES</b>	<b>7</b>
<b>I.2.1.- ECUACIONES DIFERENCIALES LINEALES</b>	<b>7</b>
<b>I.2.2.- RESPUESTA IMPULSIONAL</b>	<b>11</b>
<b>I.2.3.- INTEGRAL DE CONVOLUCION</b>	<b>14</b>
I.2.3.1.- PROPIEDADES DE LA CONVOLUCION	17
I.2.3.2.- CAUSALIDAD	23
I.2.3.3.- ESTABILIDAD	23
<b>I.2.4.- DETERMINACION DE LA RESPUESTA AL IMPULSO</b>	<b>24</b>
<b>I.2.5.- RESPUESTA AL ESCALON UNIDAD</b>	<b>26</b>
<b>I.2.6.- SINTESIS DE SISTEMAS</b>	<b>27</b>
<b>I.3.- AUTOFUNCIONES DE LA ECUACION DE CONVOLUCION</b>	<b>27</b>
<b>I.3.1.- TRANSFORMADA DE FOURIER</b>	<b>28</b>
<b>I.3.2.- UTILIZACION DE LAS TRANSFORMADAS DE LAPLACE Y FOURIER</b>	<b>28</b>
<b>I.3.3.- FORMULA DE INVERSION</b>	<b>29</b>
<b>I.3.4.- TEOREMA DE CONVOLUCION</b>	<b>31</b>
<b>I.3.5.- EJEMPLOS DE TRANSFORMADAS DE FOURIER</b>	<b>32</b>
<b>I.3.6.- INTERPRETACION DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER</b>	<b>35</b>
<b>I.3.7.- CONDICIONES DE EXISTENCIA DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER</b>	<b>35</b>
<b>I.3.8.- PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER</b>	<b>37</b>
I.3.8.1.- TRANSFORMADA DE UNA SEÑAL REAL	37
I.3.8.2.- TRANSFORMADA DE UNA SEÑAL IMAGINARIA PURA	38
I.3.8.3.- FUNCION REAL PAR	38
I.3.8.4.- FUNCION REAL IMPAR	38
I.3.8.5.- FUNCION REAL GENERAL	38
I.3.8.6.- TEOREMA DE DUALIDAD	39
I.3.8.7.- CAMBIO DE ESCALA TEMPORAL Y FRECUENCIAL	42
I.3.8.8.- RETARDO TEMPORAL	43
I.3.8.9.- DESPLAZAMIENTO FRECUENCIAL. MODULACION	44
I.3.8.10.- DIFERENCIACION	45
I.3.8.11.- INTEGRACION	46
I.3.8.12.- CONVOLUCION EN FRECUENCIA	49
<b>I.3.9.- VENTANAS</b>	<b>50</b>
I.3.9.1.- VENTANAS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO	50
I.3.9.2.- VENTANAS EN FRECUENCIA. FENOMENO DE GIBBS	52

**TEMA II.- SEÑALES PERIODICAS**

<b>II.1.- REPRESENTACION DE SEÑALES PERIODICAS</b>	<b>1</b>
<b>II.2.- TRANSFORMADA DE FOURIER DE UNA SEÑAL PERIODICA</b>	<b>3</b>
<b>II.2.1.- TRANSFORMADA DEL TREN DE IMPULSOS</b>	<b>5</b>
<b>II.2.2.- TRANSFORMADA DE LA SEÑAL PERIODICA</b>	<b>6</b>
<b>II.3.- SERIES DE FOURIER</b>	<b>6</b>
<b>II.3.1.- REPRESENTACION GRAFICA DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER DE UNA SEÑAL PERIODICA</b>	<b>7</b>
<b>II.3.2.- FORMULA DE POISSON</b>	<b>8</b>
<b>II.4.- SEÑALES PERIODICAS A TRAVES DE SISTEMAS LINEALES</b>	<b>10</b>
<b>II.5.- REPRESENTACION DE SEÑALES NO PERIODICAS MEDIANTE DESARROLLO EN SERIE DE FOURIER</b>	<b>15</b>
<b>II.6.- SEÑALES PERIODICAS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA</b>	<b>16</b>
<b>II.6.1.- MUESTREO DE SEÑALES Y TEOREMA DE NYQUIST</b>	<b>18</b>

**TEMA III.- CORRELACION Y ESPECTRO**

<b>III.1.- ENERGIA DE UNA SEÑAL</b>	<b>1</b>
<b>III.2.- ENERGIA CRUZADA</b>	<b>2</b>
<b>III.3.- FORMULA DE PARSEVAL PARA ENERGIA CRUZADA</b>	<b>2</b>
<b>III.4.- FORMULA DE PARSEVAL PARA ENERGIA</b>	<b>3</b>
<b>III.5.- SEÑALES DE POTENCIA MEDIA FINITA</b>	<b>4</b>
<b>III.6.- POTENCIA MEDIA PARA SEÑALES PERIODICAS</b>	<b>5</b>
<b>III.7.- TIPOS DE SEÑALES</b>	<b>6</b>
<b>III.8.- ESPECTRO DE POTENCIA DE SEÑALES DE POTENCIA MEDIA FINITA</b>	<b>7</b>
<b>III.8.1.- SEÑALES PERIODICAS</b>	<b>9</b>
<b>III.9.- FORMULA DE PARSEVAL PARA SEÑALES PERIODICAS</b>	<b>10</b>
<b>III.10.- MEDIDA DE PARECIDO O DISTANCIA</b>	<b>11</b>
<b>III.11.- CORRELACION CRUZADA Y ESPECTRO CRUZADO</b>	<b>13</b>
<b>III.12.- FUNCION DE AUTOCORRELACION</b>	<b>13</b>
<b>III.13 CORRELACION Y ESPECTRO DE SEÑALES DE ENERGIA FINITA A TRAVES DE SISTEMAS LINEALES</b>	<b>14</b>
<b>III.14.- CORRELACION CRUZADA DE SEÑALES DE POTENCIA MEDIA FINITA</b>	<b>15</b>
<b>III.15.- FUNCION DE AUTOCORRELACION DE SEÑALES DE POTENCIA MEDIA FINITA</b>	<b>16</b>
<b>III.16.- CORRELACION CRUZADA DE SINUSOIDES</b>	<b>17</b>
<b>III.17.- CORRELACION DE SEÑALES PERIODICAS</b>	<b>18</b>
<b>III.18.- ESPECTRO CRUZADO DE SEÑALES PERIODICAS</b>	<b>19</b>
<b>III.19.- AUTOESPECTRO DE SEÑALES PERIODICAS</b>	<b>19</b>
<b>III.20.- CORRELACION Y ESPECTRO DE SEÑALES DE POTENCIA MEDIA FINITA A TRAVES DE SISTEMAS LINEALES</b>	<b>20</b>

**TEMA IV.- SEÑALES ALEATORIAS Y RUIDO**

<b>IV.1.- CARACTERIZACION DE SEÑALES ALEATORIAS</b>	<b>1</b>
<b>IV.2.- FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE UN PROCESO ALEATORIO</b>	<b>2</b>
<b>IV.3.- VALOR MEDIO DEL PROCESO</b>	<b>3</b>
<b>IV.4.- AUTOCORRELACION</b>	<b>3</b>
<b>IV.5.- AUTOCOVARIANZA</b>	<b>3</b>
<b>IV.6.- VALOR MEDIO Y AUTOCORRELACION EN FUNCION DE LAS REALIZACIONES DEL PROCESO</b>	<b>5</b>
<b>IV.7.- PROCESOS COMPLEJOS</b>	<b>5</b>
<b>IV.8.- PROCESOS ESTACIONARIOS EN SENTIDO ESTRICTO</b>	<b>6</b>
<b>IV.9.- PROCESOS ESTACIONARIOS EN SENTIDO AMPLIO O DEBILMENTE ESTACIONARIOS</b>	<b>7</b>
<b>IV.10.- ESPECTRO DE POTENCIA DE UN PROCESO ESTACIONARIO</b>	<b>7</b>
<b>IV.11.- PROCESOS ESTACIONARIOS Y SISTEMAS LINEALES</b>	<b>8</b>
<b>IV.12.- PROCESOS ERGODICOS</b>	<b>10</b>
<b>IV.13.- RUIDO TERMICO</b>	<b>11</b>
<b>IV.14.- RUIDO BLANCO GAUSSIANO</b>	<b>14</b>
<b>IV.15.- RUIDO BLANCO FILTRADO</b>	<b>14</b>
<b>IV.16.- ANCHO DE BANDA EQUIVALENTE DE RUIDO</b>	<b>16</b>

<b>V.1.- SISTEMA DE TRANSMISION BANDA BASE ANALOGICO</b>	<b>1</b>
<b>V.2.- ELEMENTOS DEL SISTEMA DE TRANSMISION</b>	<b>1</b>
<b>V.2.1.- FUENTE</b>	<b>1</b>
<b>V.2.2.- TRANSMISOR</b>	<b>2</b>
<b>V.2.3.- CANAL DE COMUNICACIONES</b>	<b>2</b>
V.2.3.1.- PERDIDAS EN LINEAS DE TRANSMISION	3
V.2.3.2.- PERDIDAS EN EL ESPACIO LIBRE	3
<b>V.2.4.- RECEPTOR</b>	<b>4</b>
V.2.4.1.- RUIDO BLANCO ADITIVO	4
<b>V.3.- REPETIDORES</b>	<b>7</b>
<b>V.4.- DISTORSION</b>	<b>9</b>
<b>V.4.1.- DISTORSION LINEAL</b>	<b>9</b>
V.4.1.1.- ECUALIZADORES	11
<b>V.4.2.- DISTORSION NO LINEAL</b>	<b>13</b>
V.4.2.1.- COMPRESORES Y EXPANSORES	15
<b>V.5.- FILTROS TERMINALES OPTIMOS</b>	<b>16</b>

**TEMA VI.- SEÑALES Y PROCESOS PASO-BANDA**

<b>VI.1.- SEÑAL ANALITICA</b>	<b>1</b>
<b>VI.2.- TRANSFORMADA DE HILBERT</b>	<b>3</b>
<b>VI.3.- PROCESADO DE SEÑALES MEDIANTE EL USO DE LAS SEÑALES ANALITICAS</b>	<b>5</b>
<b>VI.4.- ENVOLVENTE Y FRECUENCIA INSTANTANEA</b>	<b>6</b>
<b>VI.5.- TRANSFORMADA DE HILBERT DEL PRODUCTO DE UNA SEÑAL PASO BAJO Y OTRA PAJO ALTO CON ESPECTROS QUE NO SE SOLAPAN</b>	<b>7</b>
<b>VI.6.- PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE HILBERT</b>	<b>10</b>
<b>VI.6.1.- LINEALIDAD</b>	<b>10</b>
<b>VI.6.2.- AUTOCORRELACION Y ESPECTRO DE LA TRANSFORMADA DE HILBERT</b>	<b>10</b>
<b>VI.6.3.- CORRELACION CRUZADA DE UNA SEÑAL Y SU TRANSFORMADA DE HILBERT</b>	<b>11</b>
<b>VI.6.4.- RELACION DE ORTOGONALIDAD ENTRE UNA SEÑAL Y SU TRANSFORMADA DE HILBERT</b>	<b>11</b>
<b>VI.7.- TRANSFORMADA INVERSA DE HILBERT</b>	<b>12</b>
<b>VI.8.- TRANSFORMADA DE HILBERT DE LA CONVOLUCION DE DOS SEÑALES</b>	<b>13</b>
<b>VI.9.- SEÑALES CAUSALES Y TRANSFORMADA DE HILBERT</b>	<b>13</b>
<b>VI.10.- SEÑALES PASO BANDA</b>	<b>15</b>
<b>VI.11.- EQUIVALENTE PASO BAJO</b>	<b>16</b>
<b>VI.12.- SEÑALES SIMETRICAS Y ANTISIMETRICAS</b>	<b>17</b>
<b>VI.13.- COMPONENTES EN FASE Y CUADRATURA</b>	<b>17</b>
<b>VI.14.- RETARDOS DE FASE Y DE GRUPO</b>	<b>19</b>
<b>VI.15.- FILTRADO EQUIVALENTE PASO BAJO</b>	<b>23</b>
<b>VI.16.- REPRESENTACION FASORIAL DE SEÑALES PASO BANDA</b>	<b>24</b>
<b>VI.17.- REPRESENTACION DE PROCESOS ESTACIONARIOS PASO-BANDA</b>	<b>26</b>
<b>VI.17.1.- AUTOCORRELACION Y CORRELACION CRUZADA DE LOS PROCESOS FASE Y CUADRATURA</b>	<b>27</b>

*Comunicaciones Analógicas*

<b>VI.17.2.- AUTOCORRELACION DEL PROCESO PASO BAJO</b>	<b>30</b>
<b>VI.17.3.- AUTOESPECTRO DE LOS PROCESOS FASE Y CUADRATURA</b>	<b>31</b>
<b>VI.17.4.- ESPECTRO CRUZADO DE LAS SEÑALES FASE Y CUADRATURA</b>	<b>33</b>
<b>VI.17.5.- ESPECTROS DEL PROCESO BAJO Y DEL PROCESO ANALITICO</b>	<b>34</b>
<b>VI.17.6.- PROPIEDADES DE LAS COMPONENTES FASE Y CUADRATURA DE LA AUTOCORRELACION DEL PROCESO PASO BANDA.</b>	<b>35</b>
<b>VI.18.- RUIDO BLANCO PASO BANDA</b>	<b>36</b>
<b>VI.19.- PROCESOS PASO-BANDA NO ESTACIONARIOS</b>	<b>37</b>
<b>VI.19.1.- PROCESOS PASO-BANDA CON FASE ALEATORIA</b>	<b>38</b>

**TEMA VII.- MODULACIONES LINEALES**

<b>VII.1.- INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE MODULACION</b>	<b>1</b>
<b>VII.2.- MODULACIONES LINEALES</b>	<b>2</b>
<b>VII.2.1.- AMPLITUD MODULADA (AM)</b>	<b>2</b>
VII.2.1.1.- ANCHO DE BANDA	4
VII.2.1.2.- POTENCIA TRANSMITIDA	5
VII.2.1.3.- GENERACION DE AMPLITUD MODULADA	6
<b>VII.2.1.3.1. MODULACION MEDIANTE DISPOSITIVOS NO LINEALES</b>	<b>8</b>
<b>VII.2.1.3.2.- MODULACION POR CONMUTACION O "CHOPPER"</b>	<b>9</b>
VII.2.1.4.- DEMODULACION DE AMPLITUD MODULADA	12
<b>VII.2.1.4.1.-DETECTOR DE ENVOLVENTE DE PICO</b>	<b>12</b>
<b>VII.2.1.4.2.- DETECTOR DE ENVOLVENTE PROMEDIO</b>	<b>17</b>
<b>VII.2.2.- MODULACION DOBLE BANDA LATERAL (DBL) (PORTADORA SUPRIMIDA)</b>	<b>19</b>
VII.2.2.1.- GENERACION DE DOBLE BANDA LATERAL	21
VII.2.2.2.- DETECCION COHERENTE DE DBL	23
<b>VII.2.2.2.1.- SINCRONIZACION DE PORTADORA</b>	<b>25</b>
<b>VII.2.2.2.2.- INCORPORACION DE PORTADORA</b>	<b>25</b>
<b>VII.2.2.2.3.- GENERACION DE PORTADORA MEDIANTE LAZO CUADRATICO</b>	<b>25</b>
<b>VII.2.3.- MODULACION BANDA LATERAL UNICA (BLU)</b>	<b>26</b>
VII.2.3.1.- GENERACION DE BANDA LATERAL UNICA	28
<b>VII.2.3.1.1.- DISCRIMINACION EN FRECUENCIA O FILTRADO</b>	<b>28</b>
<b>VII.2.3.1.2.- DISCRIMINACION EN FRECUENCIA EN DOBLE ETAPA</b>	<b>29</b>
<b>VII.2.3.1.3.- MODULACION POR DISCRIMINACION DE FASE</b>	<b>30</b>
<b>VII.2.3.1.4.- MODULADOR DE WEABER</b>	<b>31</b>
VII.2.3.2.- DEMODULACION DE SEÑALES BLU	32
<b>VII.2.4.- BANDA LATERAL RESIDUAL O VESTIGIAL (BLV)</b>	<b>34</b>
VII.2.4.1.- EXPRESION DE LA SEÑAL MODULADA EN EL DOMINIO DEL TIEMPO	39
VII.2.4.2.- MODULACION BLV CON PORTADORA	41
<b>VII.3.- RUIDO EN MODULACIONES LINEALES</b>	<b>41</b>
<b>VII.3.1.- RUIDO EN DOBLE BANDA LATERAL</b>	<b>41</b>
<b>VII.3.2.- RUIDO EN BANDA LATERAL UNICA</b>	<b>43</b>



**TEMA VIII.- MODULACIONES ANGULARES**

<b>VIII.1.- MODULACIONES ANGULARES</b>	<b>1</b>
<b>VIII.2.- MODULACION DE FASE Y MODULACION DE FRECUENCIA</b>	<b>1</b>
<b>VIII.2.1.- MODULACION DE FASE</b>	<b>2</b>
<b>VIII.2.2.- MODULACION DE FRECUENCIA</b>	<b>2</b>
<b>VIII.2.3.- RELACION ENTRE MODULACION DE FASE Y MODULACION DE FRECUENCIA</b>	<b>3</b>
<b>VIII.3.- COMPARACION ENTRE MODULACIONES ANGULARES Y LINEALES</b>	<b>4</b>
<b>VIII.4.- ANALISIS ESPECTRAL DE FM CON UN TONO</b>	<b>6</b>
<b>VIII.4.1.- ANCHO DE BANDA DE FM (MODULADORA : TONO SIMPLE)</b>	<b>10</b>
<b>VIII.5.- ANALISIS ESPECTRAL DE FM CON DOS TONOS</b>	<b>12</b>
<b>VIII.6.- ANCHO DE BANDA DE UNA SEÑAL FM CON UNA MODULADORA GENERAL PASO BAJO</b>	<b>14</b>
<b>VIII.7.- MODULACION DE FRECUENCIA DE BANDA ESTRECHA</b>	<b>15</b>
<b>VIII.8.- GENERACION DE FM DE BANDA ESTRECHA</b>	<b>17</b>
<b>VIII.9.- MODULACION DIRECTA DE FM DE BANDA ANCHA</b>	<b>18</b>
<b>VIII.10.- MODULACION INDIRECTA DE FM</b>	<b>19</b>
<b>VIII.11.- DEMODULADORES DE FM : DISCRIMINADOR DE FRECUENCIAS</b>	<b>20</b>
<b>VIII.12.- DETECCION DE FM USANDO UNA LINEA DE RETARDO</b>	<b>22</b>
<b>VIII.13.- LIMITADOR</b>	<b>23</b>
<b>VIII.14.- RUIDO EN MODULACIONES ANGULARES</b>	<b>25</b>
<b>VIII.15.- PRE-ENFASIS Y DE-ENFASIS EN FM</b>	<b>32</b>